

# スペースデブリ模擬構造への金属製銚 撃ち込みに関する研究

防衛大学校理工学研究科後期課程

装備・基盤工学系専攻 航空飛行システム教育研究分野

グエン バ タイン ロン

平成 30 年 3 月

## 目次

第 1 章	研究背景及び目的	1
1.1	現在のスペースデブリ状況	1
1.2	現在のスペースデブリ対策	2
1.3	結合方法について	4
1.4	金属製銚撃ち込みによる結合方法についての研究	5
1.5	金属製銚撃ち込みによる結合方法に関する従来研究での問題点	9
1.6	本研究の目的及び流れ	10
1.7	本論文の構成	11
第 2 章	固定ターゲットへの撃ち込み試験	12
2.1	試験の目的	12
2.2	金属製銚及び供試板	12
2.2.1	金属製銚	12
2.2.2	供試板	14
2.3	試験装置	14
2.4	撃ち込みに対するエネルギー及び運動量の影響評価	15
2.5	撃ち込み試験結果	17
第 3 章	自由落下している供試板への撃ち込み試験	23
3.1	試験の目的	23
3.2	試験装置	23
3.2.1	試験装置の概要	23
3.2.2	供試板	24
3.2.3	供試板自由落下のための回路設計	25
3.2.4	リレーの反応速度の測定	25
3.2.5	金属製銚の速度と自由落下状態の判定	27
3.3	試験結果	29
3.3.1	金属製銚撃ち込みの様子	29
3.3.2	試験結果のまとめ	34
3.4	非固定ターゲットでの最小貫入速度予測式の導出と妥当性評価	35
3.5	結論	39
第 4 章	金属製銚の撃ち込みに関する数値解析	40
4.1	数値解析の目的	40

4.2	数値解析の材料モデル	40
4.3	数値解析の評価	42
4.3.1	メッシュタイプとサイズの決定	42
4.3.2	数値解析の適用性評価	48
4.4	金属製銚の先端角度と供試板の傾き角度の影響評価	51
4.5	結論	53
第 5 章	引き抜き強度評価試験	54
5.1	試験目的	54
5.2	試験装置	54
5.3	試験の実施要領	55
5.4	試験結果	58
第 6 章	結論および今後の課題	70
6.1	結論	70
6.2	今後の課題	72
付録 A	他の材料への撃ち込みの試験	73
	謝辞	78
	参考文献	79
	研究業績	82

## 図表目次

### 図目次

1.1	デブリ数の推移状態	1
1.2	導電性テザー	3
1.3	デーオビトセイル	4
1.4	推進システム	4
1.5	ロボットアームによる結合方法の概要	5
1.6	ネットによる結合方法の概要	5
1.7	JAXA による概念検討	7
1.8	ESA による金属製銚の概要図	8
1.9	Duziak らによる研究の金属製銚と供試板	8
1.10	又木らによる研究の金属製銚の形状	8
1.11	貫入状態の概要	10
2.1	金属製銚 1 の概要及び外観(形状図の単位：mm)	13
2.2	金属製銚 2 の概要及び外観(形状図の単位：mm)	13
2.3	撃ち込み試験機の概要及び外観	14
2.4	試験台の外観	15
2.5	光センサの外観	15
2.6	供試板の固定方法	15
2.7	重りの概要と外観	16
2.8	運動エネルギー，運動量と貫入状態の関係	17
2.9	運動エネルギー，質量と貫入状態の関係	17
2.10	ターゲット角度の定義	19
2.11	傾けた供試板	19
2.12	金属製銚の撃ち込み状態	19
2.13	金属製銚 1 の撃ち込み試験結果	20
2.14	金属製銚 2 の撃ち込み試験結果	21
2.15	金属製銚の先端角度，ターゲット角度と最初の接触点	22
3.1	撃ち込み試験装置の概要	23
3.2	供試板の外観	24
3.3	供試板設置の様子	24
3.4	電磁石に流れる電流を遮断する回路の概要	25
3.5	反応速度測定回路の概要	26

3.6	反応速度測定回路図	26
3.7	自由落下の判定の一例(撃ち込み速度は 29m/s)	28
3.8	自由落下の判定の一例(撃ち込み速度は 45m/s)	28
3.9	自由落下試験の様子	29
3.10	金属製銚撃ち込みの様子(重心へ撃ち込み：非貫入)	30
3.11	金属製銚撃ち込みの様子(重心へ撃ち込み：貫入)	31
3.12	金属製銚撃ち込みの様子(重心へ撃ち込み：貫通)	32
3.13	金属製銚撃ち込みの様子(重心からずれた位置への撃ち込み：貫入)	33
3.14	自由落下の試験結果(重心への撃ち込み)	34
3.15	自由落下の試験結果(重心から 5cm 離れた点への撃ち込み)	35
3.16	自由落下中ターゲットへの撃ち込みの概要図	36
4.1	四角形メッシュのメッシュサイズにおける最小貫入速度	43
4.2	三角形メッシュのメッシュサイズにおける最小貫入速度	43
4.3	四角形メッシュの場合の供試板の変形（撃ち込み速度は最小貫入速度）	44
4.4	三角形メッシュの場合の供試板の変形(撃ち込み速度は最小貫入速度)	45
4.5	供試板の貫入後の変形(撃ち込み速度は 18.7m/s)	46
4.6	数値解析の各メッシュタイプにおける供試板の変形(自由落下中の場合)	47
4.7	自由落下試験の供試板の変形(撃ち込み速度:27.2m/s)	47
4.8	供試板の数値解析モデル	48
4.9	金属製銚の数値解析モデル	48
4.10	固定ターゲットの場合の数値解析結果（金属製銚 1）	50
4.11	固定ターゲットの場合の数値解析結果（金属製銚 2）	50
4.12	ターゲット角度における数値解析の最小貫入速度	52
4.13	金属製銚が最小貫入速度でターゲットを貫通するケースの一例	52
5.1	引き抜き強度評価試験装置の外観及び概要図	55
5.2	金属製銚 3 の概要図（単位：mm）	56
5.3	金属製銚 4 の概要図（単位：mm）	57
5.4	引き抜き試験の供試体の概要図（単位：mm）	57
5.5	引き抜き試験装置の構成	58
5.6	引き抜き試験結果のまとめ	60

5.7	荷重とストロークの関係(アルミニウム合金供試板-ケース 1, 金属製銚 1)	61
5.8	荷重とストロークの関係(アルミニウム合金供試板-ケース 2, 金属製銚 1)	61
5.9	荷重とストロークの関係(アルミニウム合金供試板-ケース 3, 金属製銚 1)	62
5.10	荷重とストロークの関係(アルミニウム合金供試板-ケース 4, 金属製銚 2)	62
5.11	荷重とストロークの関係(アルミニウム合金供試板-ケース 5, 金属製銚 2)	63
5.12	荷重とストロークの関係(アルミニウム合金供試板-ケース 6, 金属製銚 2)	63
5.13	荷重とストロークの関係(アルミニウム合金供試板-ケース 7, 金属製銚 3)	64
5.14	荷重とストロークの関係(アルミニウム合金供試板-ケース 8, 金属製銚 3)	64
5.15	荷重とストロークの関係(アルミニウム合金供試板-ケース 9, 金属製銚 3)	65
5.16	荷重とストロークの関係(アルミニウム合金供試板-ケース 10, 金属製銚 4)	65
5.17	荷重とストロークの関係(アルミニウム合金供試板-ケース 11, 金属製銚 4)	66
5.18	荷重とストロークの関係(アルミニウム合金供試板-ケース 12, 金属製銚 4)	66
5.19	引き抜き試験時の供試板の様子：金属製銚傘部が引掛からない場合の様子(ケース 1, 金属製銚 1)	67
5.20	引き抜き試験時の供試板の様子：金属製銚傘部が引掛かった場合の様子(ケース 2, 金属製銚 1)	67
5.21	金属製銚の傘部が供試板の花弁部に引っ掛かった場合と引っ掛からない場合の概要	68
5.22	金属製銚が供試板の花弁部に引掛かった場合の引き抜きの様子	69
A.1	アルミハニカムサンドイッチ供試板—金属弾 1 の撃ち込み速度と結合状態	73
A.2	アルミハニカムサンドイッチ供試板—金属弾 2 の撃ち込み速度と結合状態	74

A.3	アルミハニカムサンドイッチ供試板—金属弾 3 の撃ち込み速度と結合状態	74
A.4	CFRP 供試板—金属弾 1 の撃ち込み速度と結合状態	75
A.5	CFRP 供試板—金属弾 2 の撃ち込み速度と結合状態	75
A.6	CFRP 供試板—金属弾 3 の撃ち込み速度と結合状態	76
A.7	アルミハニカムサンドイッチ供試板への撃ち込み試験様子	76
A.8	CFRP 供試板への撃ち込み試験様子	77

## 表目次

2.1	各金属製銚の質量	13
3.1	反応速度の測定結果	26
3.2	試験結果と導出した式からの予測結果	39
4.1	アルミニウム合金 A2024-T3 の一般パラメータ	40
4.2	2 等方直線モデルのパラメータ	40
4.3	J-C モデルのパラメータ	42
4.4	数値解析の各メッシュタイプにおける最小貫入速度(自由落下の場合)	46
4.5	固定された供試板の正面に撃ち込む場合の実験と数値解析における結果(金属製銚 1)	49
4.6	自由落下中の供試板の正面に撃ち込む場合の実験と数値解析における結果(金属製銚 1)	50
5.1	アルミニウム合金供試板の最大引き抜き強度	60
A.1	各供試板の部材及びサイズ	73

## 第1章 研究背景及び目的

### 1.1 現在のスペースデブリの状況

現在、低軌道及び静止軌道で地上から観測できている 10 cm 以上のスペースデブリは約 17000 個である<sup>1)</sup>。また、数十億個の 1 mm 未満のかけらが低軌道では秒速 7~8km/s で、静止軌道では秒速約 3 km/s で、飛び交っている。図 1.1 は 1957 年から 2017 年までの間の各種デブリの数の推移状態である<sup>2)</sup>。スペースデブリは、爆発破片類、宇宙機、ミッション関連分離放出部品類、ロケット上段機体の 4 種類に分類することができる。スペースデブリは人類の宇宙開発が進むにつれて増えてきた。特に近年では、人工衛星同士の衝突や人工衛星をミサイルで破壊などにより急激に増加している。

2006 年に NASA は ESA と協力し、現在の宇宙環境の安定性に関する最初の分析を実施し、更なる対象物が環境に追加されない（発射されず、残骸が放出されない）シナリオについて検証した<sup>3,4)</sup>。ESA のシミュレーションの結果、これらの条件の下でさえも軌道上物体の数が増加することが示されている。スペースデブリは地上からの宇宙開発の妨げになるとともに、将来的にスペースデブリが自己発生し、コントロール不能になるというケスラーシンドロームと呼ばれる現象についても、その可能性が懸念されている。即ち、デブリの空間密度が高くなるとデブリ同士の衝突が活発になり、デブリが際限なく増加し、その結果、地球全体がデブリに覆い尽くされ人類が宇宙を利用できなくなってしまう状態になりかねない。そのため、現在の宇宙開発においてはスペースデブリの発生を抑える工夫が進められているが、現存するスペースデブリを除去することも大きな課題である。NASA と ESA の研究では、1 年に 10 個のスペースデブリを LEO から除去することで環境が安定化できることが示されている<sup>4)</sup>。



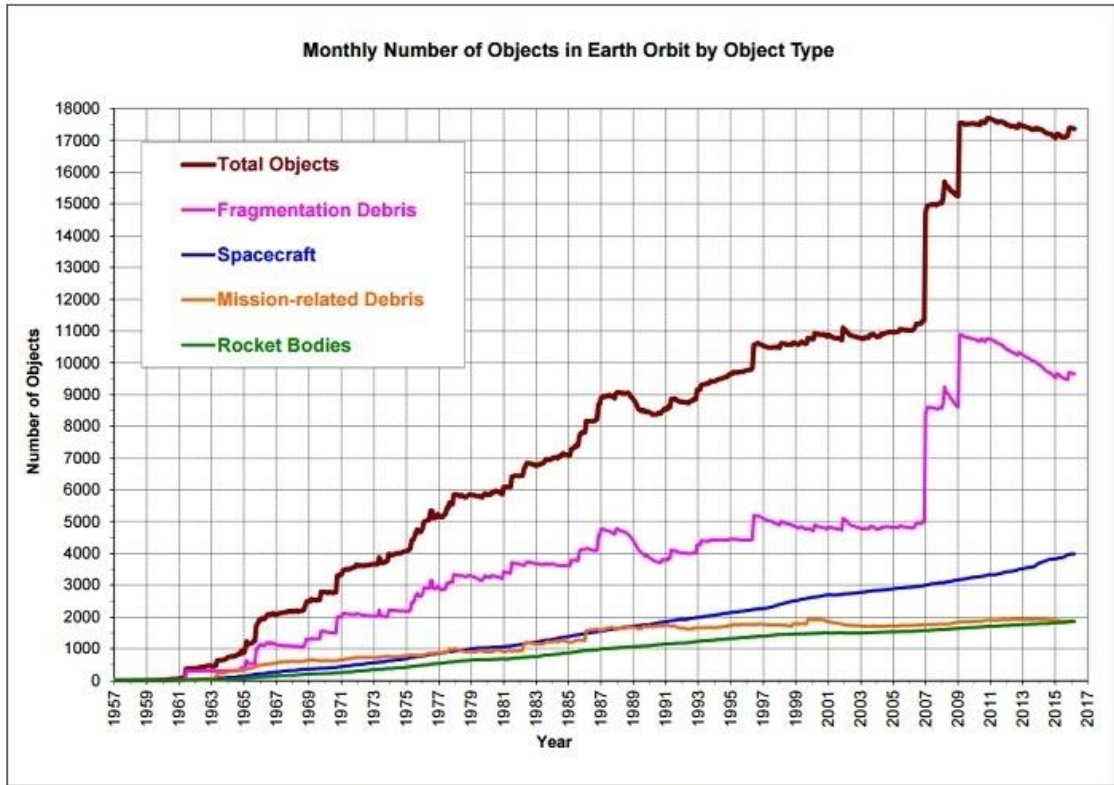


図 1.1 デブリ数の推移状態<sup>2)</sup>

## 1.2 現在のスペースデブリ対策

スペースデブリの除去に向け、各国で様々な提案がなされている。スペースデブリ除去システムのほとんどはまだ提案・研究段階で実現されていない状況である。その原因として秒速数 km で運動している対象デブリを確保する際に精密な姿勢制御や誘導が必要であること、対象デブリがどのような運動をしているか (例えば回転運動) や、捕獲時に予想される運動などを推定しなければならないこと、帯電している可能性のある対象デブリに接触することで除去衛星のシステムがダウンする可能性があること、また高いコストなど多くの問題がある。これらの提案の中で、ミッションが終了した衛星を大気圏まで自力で落とすため、さらに今ある自力で軌道変更が不可能なスペースデブリを除去するための有力な候補として導電性テザー (EDT)<sup>5-7)</sup>、デオービットセイル<sup>8)</sup>、推進システム<sup>9,10)</sup>が注目されている。図 1.2~1.4 にそれぞれ各スペースデブリの回収方法の概要を示す。これらの方法においては、スペースデブリ構体と除去システムを結合する必要がある。

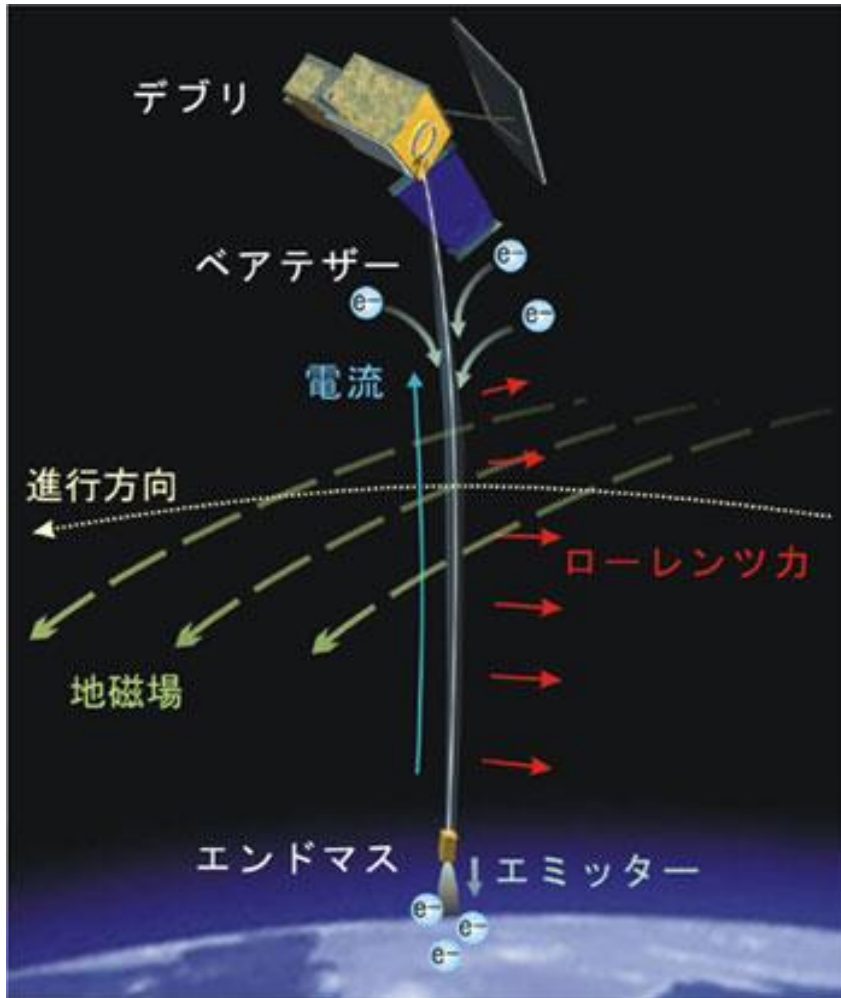


図 1.2 導電性テザー<sup>6)</sup>

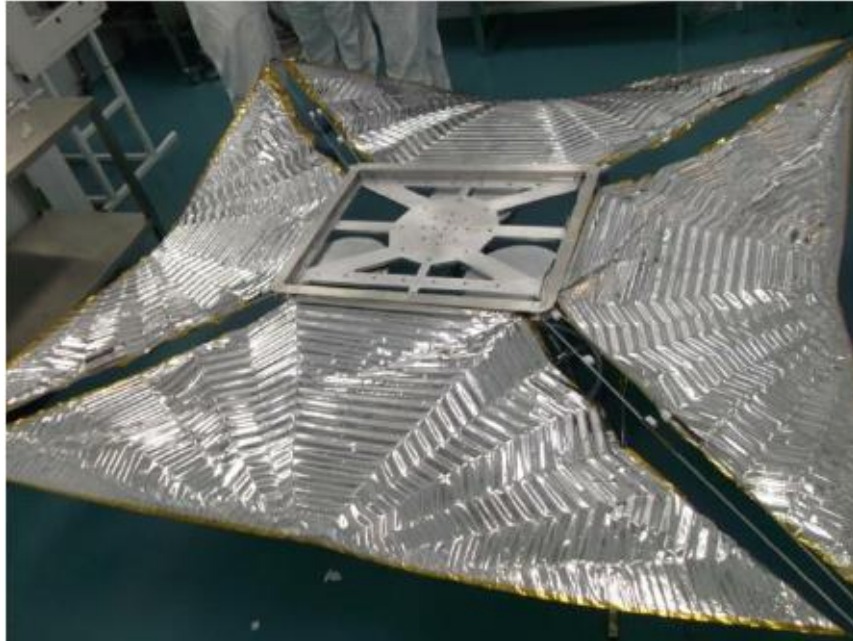


図 1.3 デオービットセイル<sup>8)</sup>

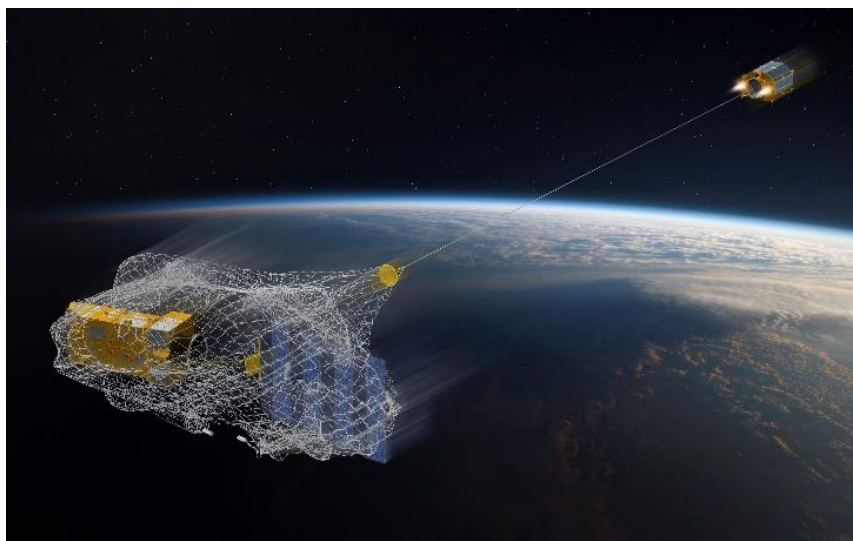


図 1.4 推進システム<sup>10)</sup>

### 1.3 結合方法について

スペースデブリ構体とデブリ除去システムとの結合方法に関して、様々な方法が提案されている：ロボットアーム<sup>11-14)</sup>、ネットシステム<sup>15-17)</sup>、金属製鉗撃ち込みによる結合方法<sup>18-22)</sup>などである。これらの中で、ロボットアームやネットシステムでは、複雑なシステムが必要となる。図 1.5,1.6 はロボットアームとネッ

トシステムの概要を示す。その一方、簡素な結合方法として、金属製銚撃ち込みによる方法が提案されており、研究が進められている<sup>18-22)</sup>。本研究でも、この金属製銚による結合方法に焦点を置き、研究を行う。

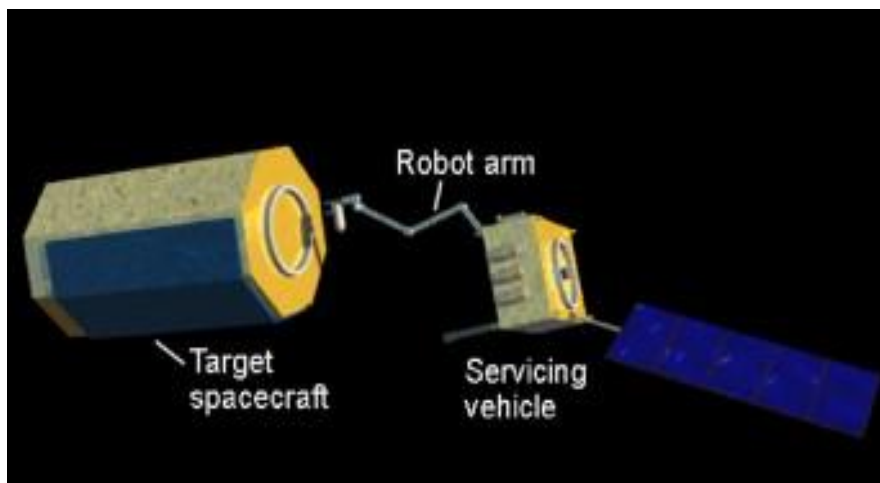


図 1.5 ロボットアームによる結合方法の概要<sup>11)</sup>

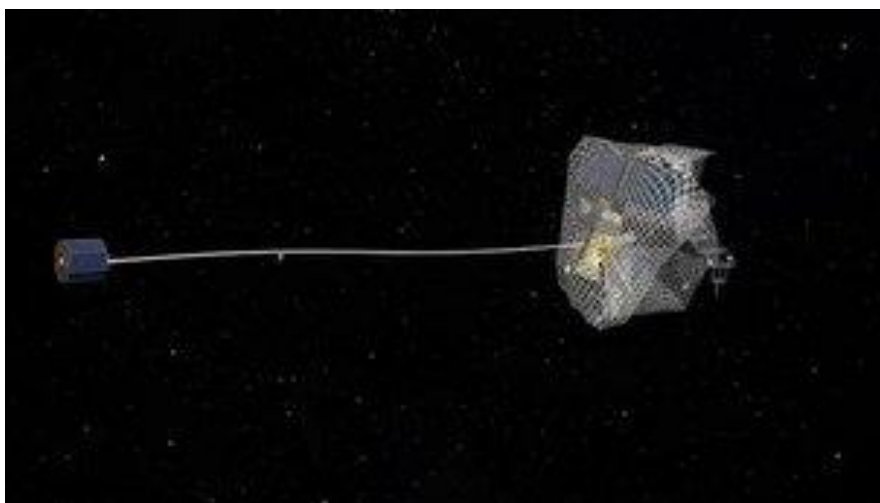


図 1.6 ネットによる結合方法の概要<sup>17)</sup>

#### 1.4 金属製銚撃ち込みによる結合方法についての研究

金属製銚撃ち込みによる結合方法について、JAXA や ESA による概念検討が行われている<sup>18,19)</sup>。図 1.7, 1.8 は JAXA のデブリ捕獲システムと ESA の金属製

銚の概要図である。例えば JAXA の捕獲システムでは、最初、デブリ除去システムを搭載した衛星をターゲットへ接近、ターゲットから 20m 離れた距離にてターゲットに対し相対的に衛星を停止させ、火薬またはバネにより銚を射出する。その後、ターゲットと結合、デブリ除去システムを衛星から分離させ、EDT テザーを伸ばし、軌道上よりデブリを除去する<sup>18)</sup>。

近年、金属製銚の撃ち込みについての具体的な研究も進んでいる。Dudziak らは円錐形、角柱形の先端形状を持つ金属製銚の撃ち込みについて、数値解析と実験による検討を行っており、金属製銚の撃ち込みによる結合の可能性を示している<sup>20)</sup>。この研究では傾いたターゲットに対する撃ち込み試験も行われているが、撃ち込み角度に関する試験数が少なく、金属製銚の先端角度と、撃ち込み可能角度の関係については検討がなされていない。また、引き抜き強度試験も行われているが、強度を上げるために引き抜き時に引っかかりを生じさせる展開型部材を組み込んだものであり、金属製銚衝突時の衝撃により、貫入前に展開部が開く、あるいは機構が破損し貫入後も展開しないなどの恐れがある構造となっている。その他、又木らは先端形状の異なる金属製銚の撃ち込み試験を行い、撃ち込みに対する先端形状の影響を評価しているが、金属製銚を貫通させることを前提としており、適切な貫入状態については未検討な他、対象構造の傾きについては検討がなされていない<sup>21)</sup>。なお金属製銚がデブリ構造表面を貫通した状態では、金属製銚が完全にデブリ内部に入ることとなるため、結合しているテザーが貫入時に生じる貫通孔やデブリ内部と接触し切断される恐れがあるなど、問題がある。図 1.9 は Dudziak らによる研究の金属製銚と供試板の設置を、図 1.10 は又木らによる研究の金属製銚の形状を示す。

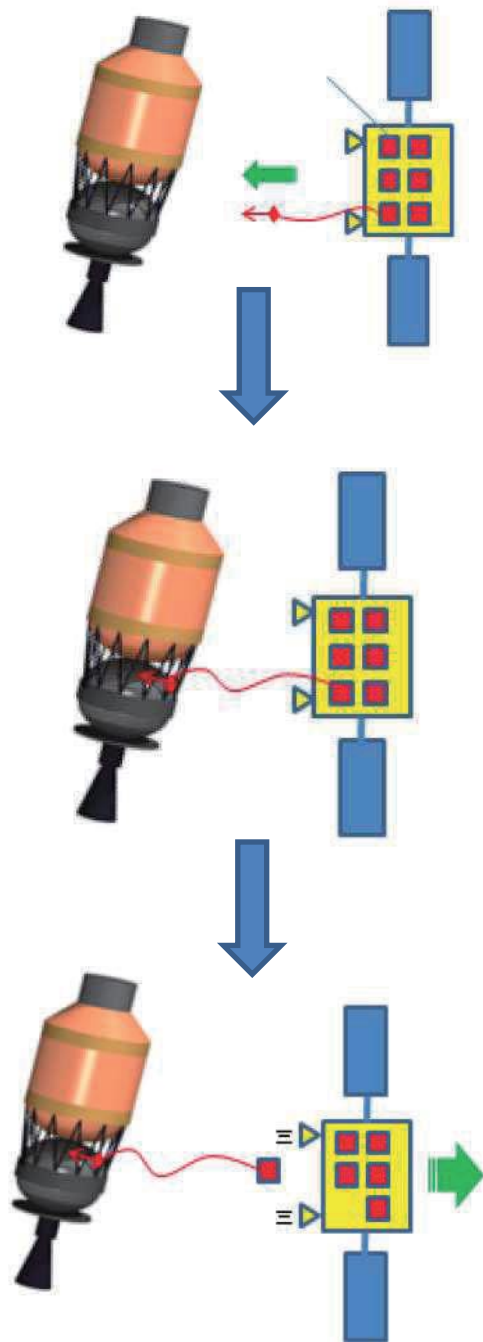


図 1.7 JAXA による概念検討<sup>18)</sup>



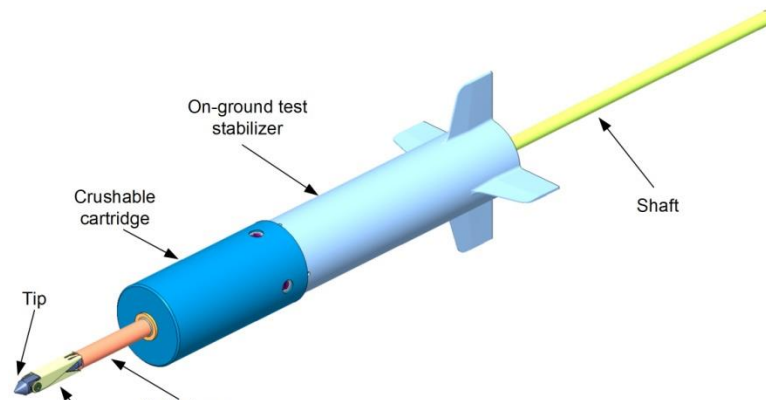


図 1.8 ESA による金属製銛の概要図<sup>19)</sup>

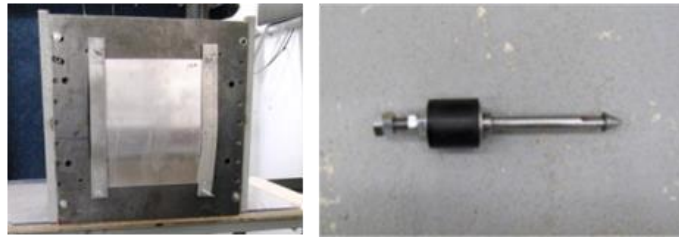


図 1.9 Duziak らによる研究の金属製銛と供試板<sup>20)</sup>



図 1.10 又木らによる研究の金属製銛の形状<sup>21)</sup>

## 1.5 金属製銚撃ち込みによる結合方法に関する従来研究での問題点

過去の研究では、撃ち込み特性を評価するために、実験による検討が行われていた<sup>16,17)</sup>。しかし、これらの実験では、固定ターゲットへの撃ち込みは実施されているが、固定されていないターゲットへの撃ち込み試験は試験装置も存在せず、特性は調べられていない。質量と慣性モーメントが大きいスペースデブリとの結合には、固定している供試体への試験結果は適用できるが、軌道上にはサイズが小さいスペースデブリも多く存在する。そのようなデブリとの結合について検討するためには、固定されていないターゲットへの撃ち込み試験も行う必要がある。また、金属製銚を撃ち込む時、実際の宇宙環境では、スペースデブリの姿勢は一定ではなく、撃ち込み角度が変るため、様々な角度での撃ち込みについての検討が必要となる。さらに、実際のミッションでは、スペースデブリのサイズ、形状や姿勢が様々であり、それらを検査するため、金属製銚撃ち込みに関する有効な数値解析モデルを構築すべきである。

ここで、金属製銚を撃ち込む際、撃ち込み条件により、大きく「非貫入(Not Penetrating)」、「貫入(Penetrating)」、「貫通(Passing Through)」の三つの貫入状態が生じる(図 1.11)。金属製銚が貫通すると、内部部品を破壊する可能性があり、内部の微小デブリが流出される可能性がある。また金属製銚に取り付けたテザーを用いる場合、テザーがスペースデブリ内部に入り、貫入孔のエッジや衛星内部のエッジとの接触により、テザーが切断することも懸念される。そこで本研究では、金属製銚を撃ち込む際、ターゲットの表面を貫通せず、表面に貫入した状態(図 1.11 中央)を理想状態として実現を目指す。

また、金属製銚を撃ち込んだ後、運用時において、金属製銚を引き抜く力が発生するため、十分な引き抜き強度が必要だが、複雑な引き抜き防止装置では誤動作の可能性があるので、引き抜き強度を上げる簡素な方法が必要と考えられる。



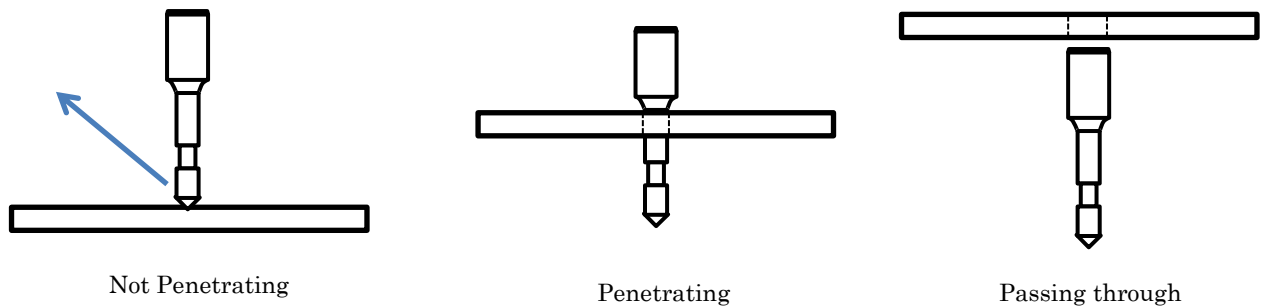


図 1.11 貫入状態の概要

## 1.6 本研究の目的及び流れ

本研究では、金属製銚形状を工夫することで、引き抜き防止装置を必要としない簡素なシステムにより、大きさの異なる多様なデブリとの結合を実現するための基礎技術の確立を目指す。金属製銚の形状工夫に関する基本コンセプトを提案するとともに、大小様々なデブリとの結合に利用できる数値解析モデルの構築を行う。またその為に、これまで検討されていなかった固定されていないターゲットへの撃ち込み試験装置を開発、試験を行う。具体的には、以下のような検討を実施する。

金属製銚形状に関しては、貫入時にターゲットを花卉状に切裂き、その花卉部を金属製銚の一部に引掛け、引き抜き強度の向上が見込める形状をとする。また、図 1.11 に示す適切な貫入状態を実現できるよう、貫通を避けるための工夫を行う。そこで金属製銚については以下の方針を提案する。

- ・ターゲットを花卉状に裂くよう、先端形状を円錐形状とする<sup>21)</sup>。
- ・引抜時に花卉部を引掛けるよう、金属製銚軸部にくびれ部を設ける。
- ・貫通を避けるよう、金属製銚の後部を太くする。

これらの金属製銚形状の工夫について、試験及び解析によりその有効性を確認する。

まず固定ターゲットへの撃ち込み試験を行い、ターゲットの傾き角度の影響を評価する。次に、自由落下ターゲットへの撃ち込み試験装置を開発し、撃ち込み試験を行い、その特性を検討する。この自由落下ターゲットへの撃ち込み試験は世界初の試みであり、装置の開発も大きな研究課題となる。

次に、金属製銚をターゲットへ結合した後、引き抜き試験により、引き抜き強

度について評価を行い、先に示した複雑な引き抜き防止機構を排した、金属製銚形状の工夫のみによる引き抜き強度確保法の有効性を検討する。さらに、金属製銚の撃ち込み試験結果に基づいて、有効な数値解析モデルを構築する。極端に異なる二つの境界条件の現象を統一的に表現できる数値解析モデルにより、多様なスペースデブリ（サイズと姿勢）に対応できると考えられる。その後、その数値解析モデルを利用し、ターゲット角度と金属製銚の先端角度が貫入状態に及ぼす影響についてさらに詳しく評価し、先行研究で検討が不十分な点を明確にする。これらの試験と数値解析を通して、結合に適切な金属製銚についての指針を得る。

実ミッションでは様々な対象に適した形状の金属製銚が必要となるが、今回提案する形状コンセプトを基礎として、構築した数値解析モデルを用いた形状最適化を実施することで実ミッションにおいて利用できる金属製銚の開発が期待できる。

## 1.7 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。第 2 章では、固定ターゲットへの撃ち込み試験について、撃ち込み特性とターゲットの傾き角度の影響について述べる。第 3 章では、自由落下ターゲットへの撃ち込み試験について、開発した試験装置の概要、撃ち込み特性及び自由落下ターゲットへの撃ち込みにおける最小貫入速度の予測式の導出について述べる。第 4 章では、試験結果に基づく数値解析モデルの構築と数値解析の有効性評価、また構築した数値解析モデルによるターゲットの傾き角度の影響評価について述べる。第 5 章では、ターゲットとの結合後、運用時における結合強度を評価するための引抜試験について述べる。第 6 章は本研究の成果をまとめる。

## 第2章 固定ターゲットへの撃ち込み試験

### 2.1 試験の目的

スペースデブリ構体を模した固定された供試板に対して、アンカーとして用いる金属製銚を撃ち込む試験を行い、その基礎特性を調べる他、金属製銚の先端角度とターゲットの角度が貫入状態に及ぼす影響を評価する。また、得られた試験結果は有効な数値解析モデルの構築に利用する。

### 2.2 金属製銚及び供試板

#### 2.2.1 金属製銚

本試験では、金属製銚の先端角度の貫入状態に対する影響を評価するために、先端角度が異なる2種類の金属製銚を使用した。アンカーとなる金属製銚は撃ち込みの際に貫通することなく、適切な結合となる必要がある。そこで、貫通を避けるため後端を太くした。金属製銚先端は円錐形の形状とした。円錐形の先端形状を用いることで、貫入時にアルミニウム合金板では花卉形状の変形が発生すること過去の研究から分かっている<sup>21)</sup>。本研究では花卉状破壊時の弾性変形分を利用し金属製銚を保持するとともに、金属製銚の軸部にくびれを配することにより、引き抜き時に、くびれ部を花卉状部に引っ掛け、結合強度の向上を期待したものである。金属製銚の軸部の一部を細くした金属製銚を製作し、その有効性を本研究で評価する。金属製銚の根元の直径は試験装置の加速管直径から設定した。金属製銚の概要と外観を図2.1, 2.2に示す。金属製銚のサイズは根元のサイズ(D)との比でも示している。各金属製銚の材料はSS400である。質量を表2.1に示す。形状の異なる複数の金属製銚の貫入特性を評価することにより、提案する金属製銚形状の有効性を示すほか、対象構造物の傾きに対する金属製銚先端角度の影響を明らかにする。

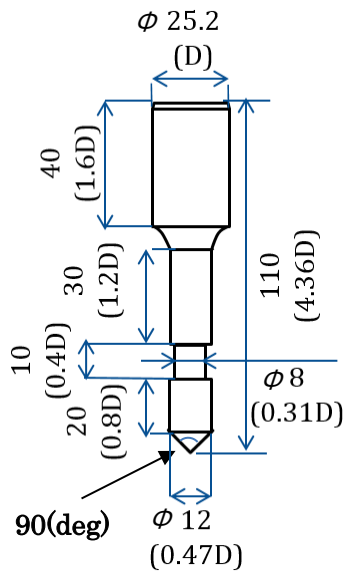


図 2.1 金属製銛 1 の概要及び外観(形状図の単位 : mm)

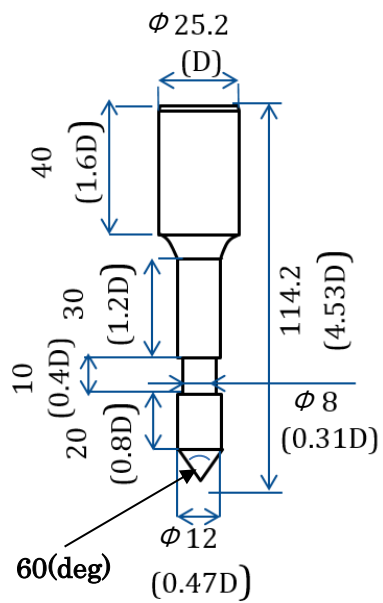


図 2.2 金属製銛 2 の概要及び外観(形状図の単位 : mm)

表 2.1 各金属製銛の質量

金属製銛	質量(g)
1	203
2	205

## 2.2.2 供試板

スペースデブリの構体は様々部材から構成されているが、本研究では代表的な材料としてアルミニウム合金 A2024-T3 を使用し、撃ち込みの基礎特性を調べる。供試板の寸法は  $250 \times 250 \times 1$  [mm] である。なお、アルミニウム合金板以外の部材についても撃ち込み試験を行なったが、部材の詳細が不明であったため、結果を付録に示すこととする。

## 2.3 試験装置

本実験では金属製鉛の撃ち込みに空気銃式衝撃試験装置を用いる。図 2.3 に試験装置の概要と外観を示す。制御盤で撃ち出し圧力を設定し撃ち込み速度を調整する。本試験では、必要な撃ち出し圧力が  $0.1-0.25$  (MPa) 程度であった。撃ち込み速度は射出管先端に  $10\text{cm}$  の距離を離して設置した 2 対の光センサー (KEYENCE FS2-65) とデータロガー (GRAPHTEC GL7000) より計測する。また、撃ち込みの動画を収録するために、高速度カメラを設置した。供試板は試験台となるアルミフレームに 8 個のネジで完全に固定する。試験台の外観を図 2.4、光センサーを図 2.5、供試板の固定方法を図 2.6 に示す。

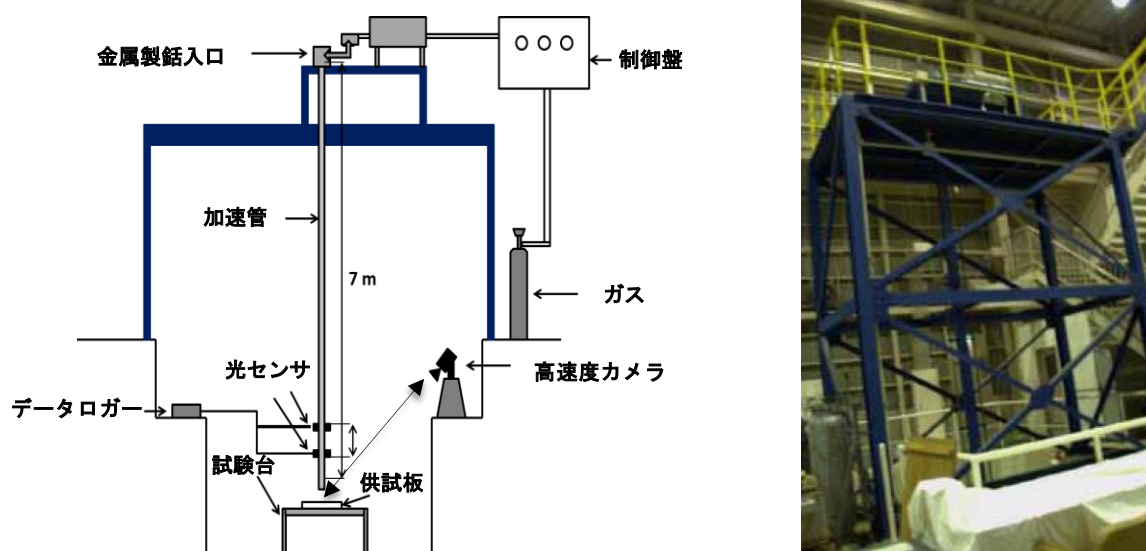


図 2.3 撃ち込み試験機の概要及び外観

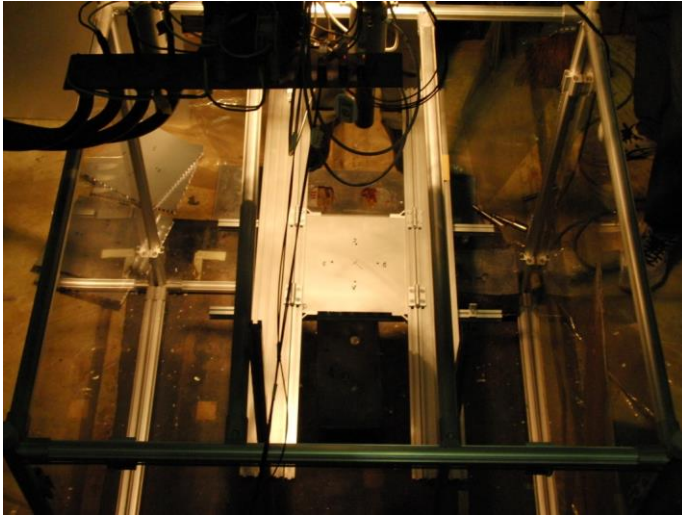


図 2.4 試験台の外観

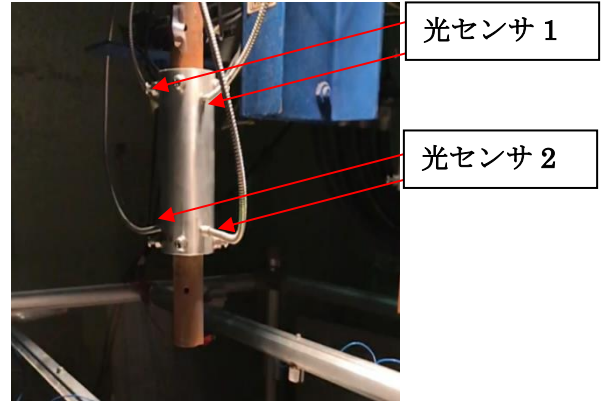
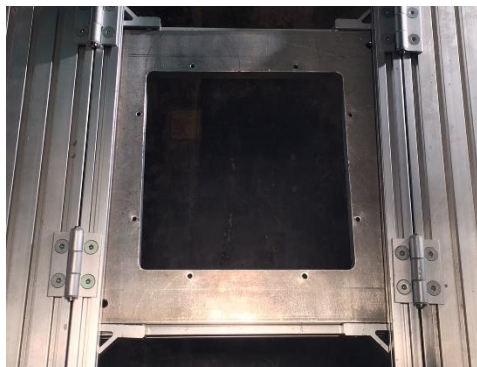
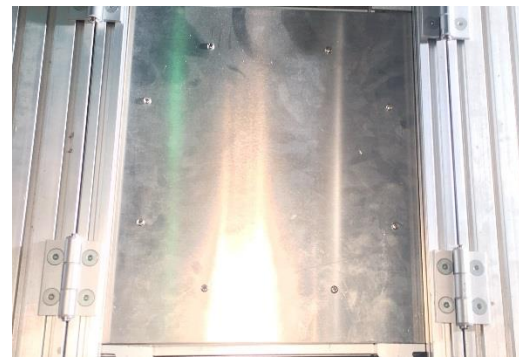


図 2.5 光センサの外観



アルミフレームの外観



ネジでアルミフレームに固定された供試板

図 2.6 供試板の固定方法

## 2.4 撃ち込みに対するエネルギー及び運動量の影響評価

金属製銚の撃ち込みでは、対象物の材料を破壊する形で金属製銚を突き刺すこととなり、その挙動は運動エネルギーや運動量の影響を受けることが予想される。それで、本試験では、同一の金属製銚に付加質量を加えて試験を行い、先端形状をそろえた状態で、運動エネルギー及び運動量の影響について評価する。金属製銚として金属製銚 1 を使用し、その後ろに付加質量を付けることにより質量を変更する。それぞれ付加質量の概要図及び外観を図 2.7 に示す。

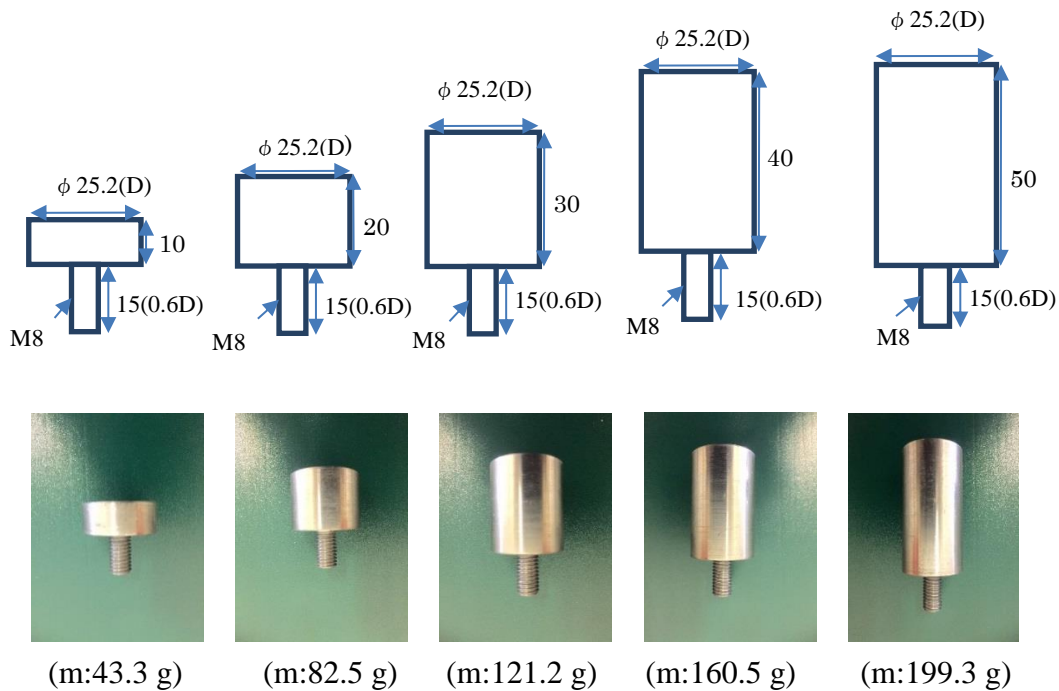


図 2.7 重りの概要と外観

金属製銚 1 に付加質量を加えて様々な撃ち込み速度で試験を行い、運動エネルギー及び運動量を計算し、図 2.8 にまとめた。図 2.8 から、運動エネルギーに注目すると、エネルギーがほぼ同じケースでは、結合状態も同じとなっており、運動エネルギーの増加に伴って、結合状態の範囲が明確に区別できる。一方、運動量に注目した場合、同じ運動量で複数の結合状態を示すケースがあり、結合状態の範囲が明確に区別できていない。運動エネルギーの影響をさらに明確にするために、運動エネルギー、金属製銚の質量と貫入状態の関係を図 2.9 に示す。図 2.9 から、質量の異なる金属製銚を用いても同じ運動エネルギーになった場合には、ほぼ同様の結合状態が得られる。これらの結果から、金属製銚の貫入状態は運動エネルギーの影響が大きいことが分かるため、以下の検討では運動エネルギーを評価基準とする。



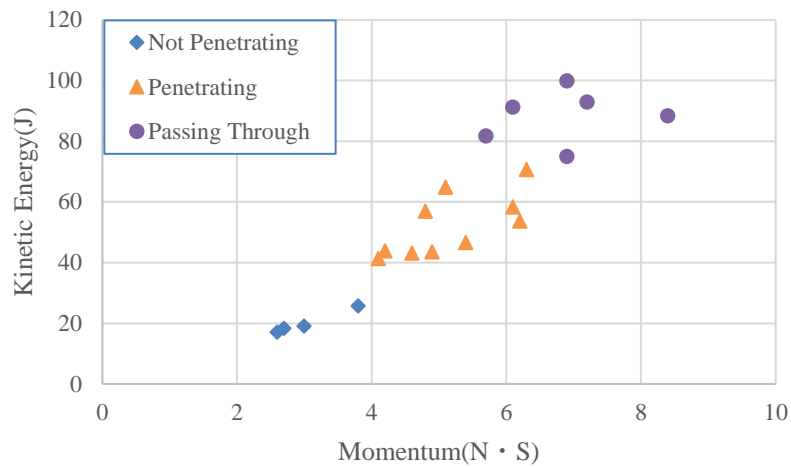


図 2.8 運動エネルギー，運動量と貫入状態の関係

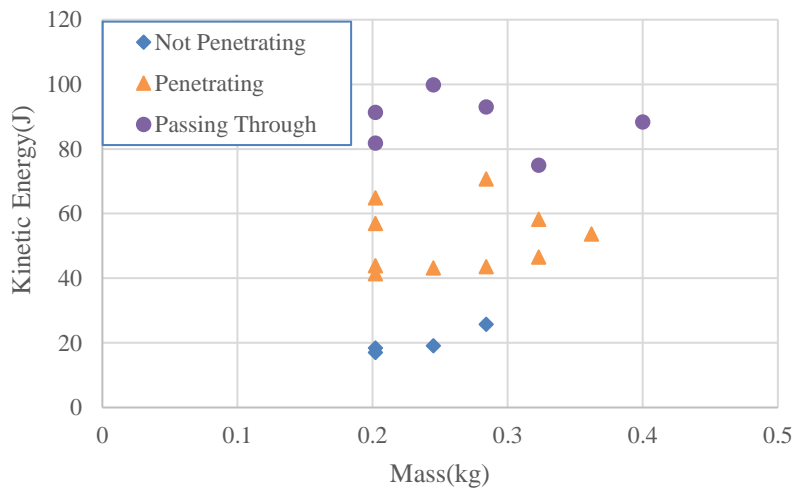


図 2.9 運動エネルギー，質量と貫入状態の関係

## 2.5 撃ち込み試験結果

金属製銚の貫入状態に対する，金属製銚形状とターゲットの角度の影響を評価するため，金属製銚撃ち込み試験を行った．まずは金属製銚の先端形状とターゲット角度の影響を調べるため，供試板の設置角度を変えながら撃ち込み試験を実施した．ターゲット角度の定義と用いた治具を図 2.10 に，異なる角度の供試板の設置状態を図 2.11 に示す．供試板はアルミニウム合金板を用いた．供試板の傾き角度  $0^\circ$ （金属製銚の撃ち込み方向に正対）， $30^\circ$ ， $45^\circ$ ， $60^\circ$ に設置した供試板に対し，撃ち出し圧力を変えながら，金属製銚 1,2 を撃ち込み，撃ち込み速度及び結合状態を確認した．試験を行った後，金属製銚先端には，目立つ塑性変



形がなく、試験の結果に影響がないと考え、金属製銼は再利用した。撃ち込み後の金属製銼及び供試板の結合状態を図 2.12 に、試験結果を図 2.13, 2.14 に示す。金属製銼が供試板に貫入した後、花卉部が発生し、この例では4つの花卉部に起因する四角形のような穴ができた。

まず供試板を正対させた  $0^\circ$  の傾き角度の場合、運動エネルギーが小さいと（速度が遅い場合）、金属製銼が供試板に刺さらず、運動エネルギーが大きすぎる場合（速すぎる場合には）、貫通する結果が得られている。運動エネルギーと貫入状態を見た場合、先端の形状（金属製銼の種類）によらず同じ運動エネルギーでは、ほぼ同じ状態が得られている。

供試板の傾き角度が  $30^\circ$  の場合、全ての金属製銼でアルミ合金供試板への貫入が確認できたものの、 $0^\circ$  の場合に比べ必要な速度（エネルギー）が増加した。

供試板の角度が  $45^\circ$  の場合、金属製銼 1 は撃ち込み速度を  $40 \text{ m/s}$  程度まで上げても金属製銼が刺さらず、金属製銼が供試板上を滑る現象が見られた。これはターゲットの角度の余角が金属製銼 1 の先端角度  $90^\circ$  の半分であるため、金属製銼の先端が供試板に接触するのとほぼ同時に、金属製銼先端の斜面部が供試板に接触してしまい、貫入状態を作れなかったためと考えられる。金属製銼の先端角度とターゲット角度の関係の概要を図 2.15 に示す。一方、先端角度の鋭い金属製銼 2 に関しては、各状態が生じる運動エネルギーが上昇するものの、運動エネルギーの上昇に合わせて、非貫入・貫入・貫通と状態が得られており、適切な貫入状態を作れる運動エネルギー域があることが分かる。ターゲットの角度が  $60^\circ$  の場合、全ての金属製銼は貫入できず、供試板表面を滑ることが確認できた。これは、ターゲット角度の余角が先端角度の鋭い金属製銼 2 の先端角度  $60^\circ$  の半分となってしまったためである。

以上のことより、金属製銼の先端角度とターゲット角度に関しては、概ね金属製銼先端角度の半分以下の供試板の傾き角度では、金属製銼の撃ち込み可能性が高いこと、ターゲットの角度の上昇とともに必要な運動エネルギーが上昇することが分かる。

なお以下の検討では、貫入状態に必要な最小の撃ち込み速度を"最小貫入速度"と呼ぶこととする。

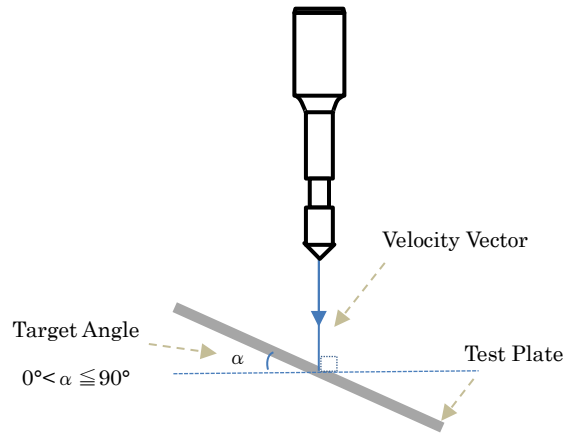


図 2.10 ターゲット角度の定義



ターゲット角度:30°

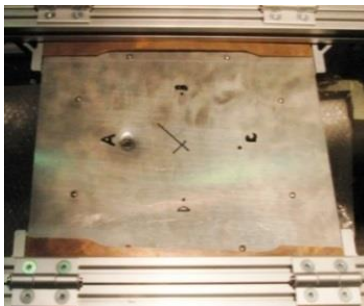


ターゲット角度:45°

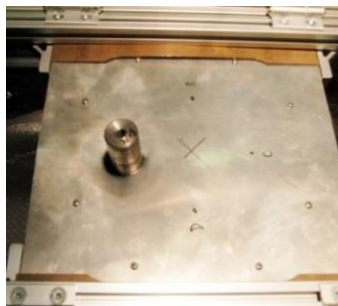


ターゲット角度:60°

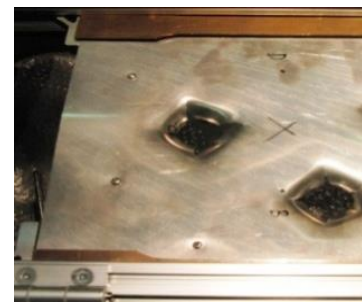
図 2.11 傾けた供試板



Not Penetrating

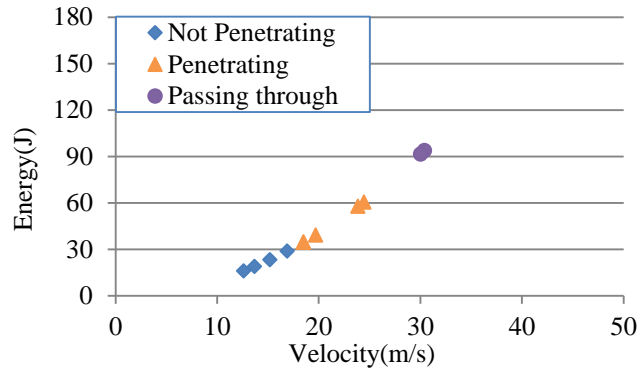


Penetrating

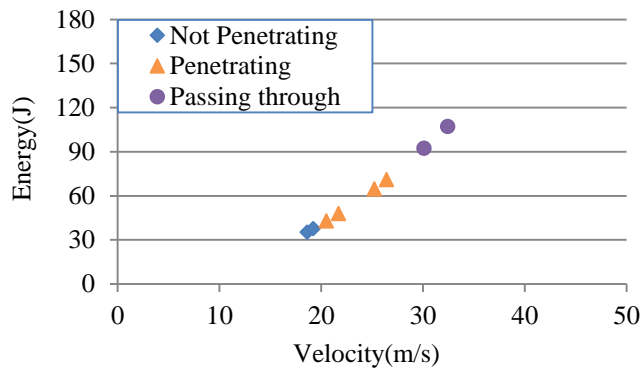


Passing through

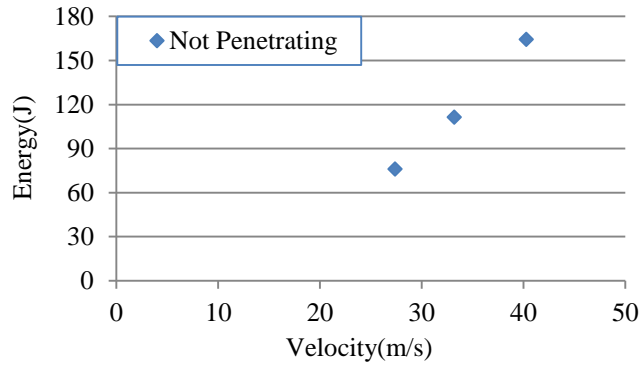
図 2.12 金属製銚の撃ち込み状態



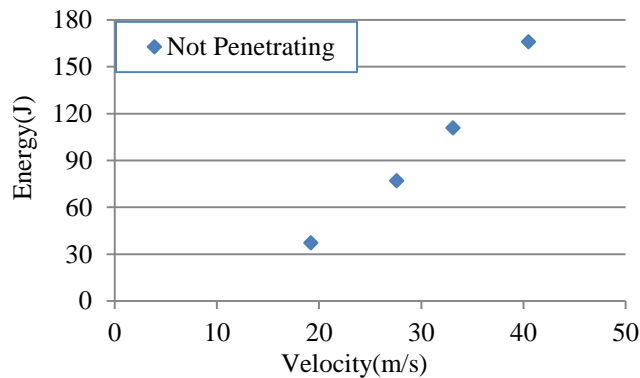
ターゲット角度：0度



ターゲット角度：30度



ターゲット角度：45度



ターゲット角度：60度

図 2.13 金属製鉛 1 の撃ち込み試験結果

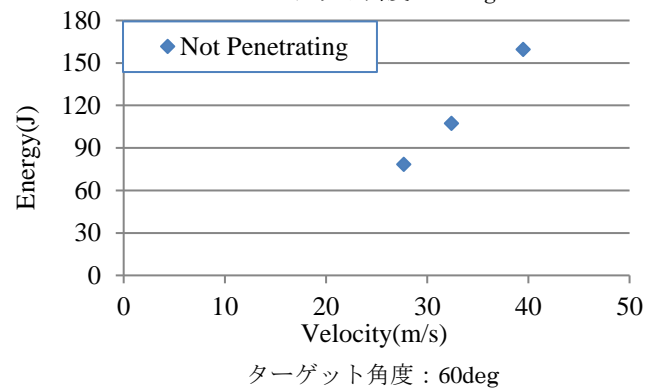
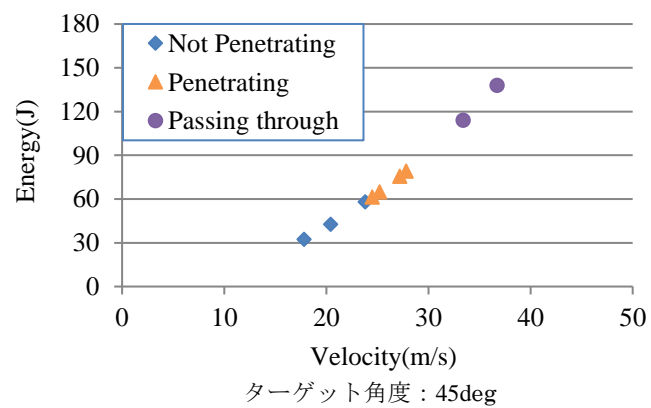
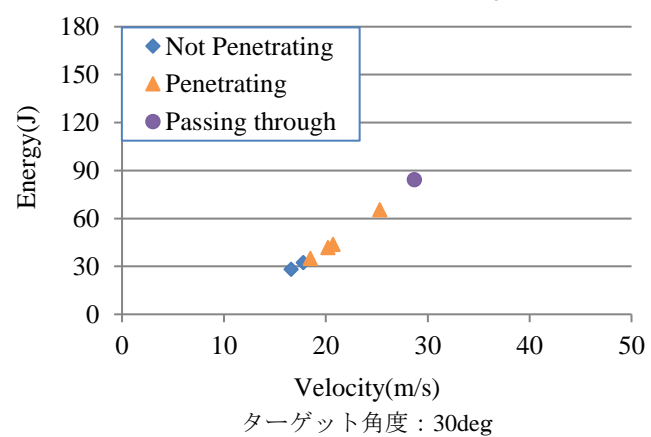
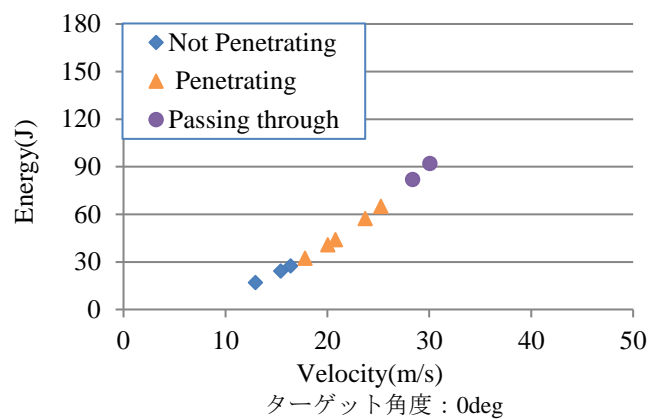


図 2.14 金属製鉛 2 の撃ち込み試験結果

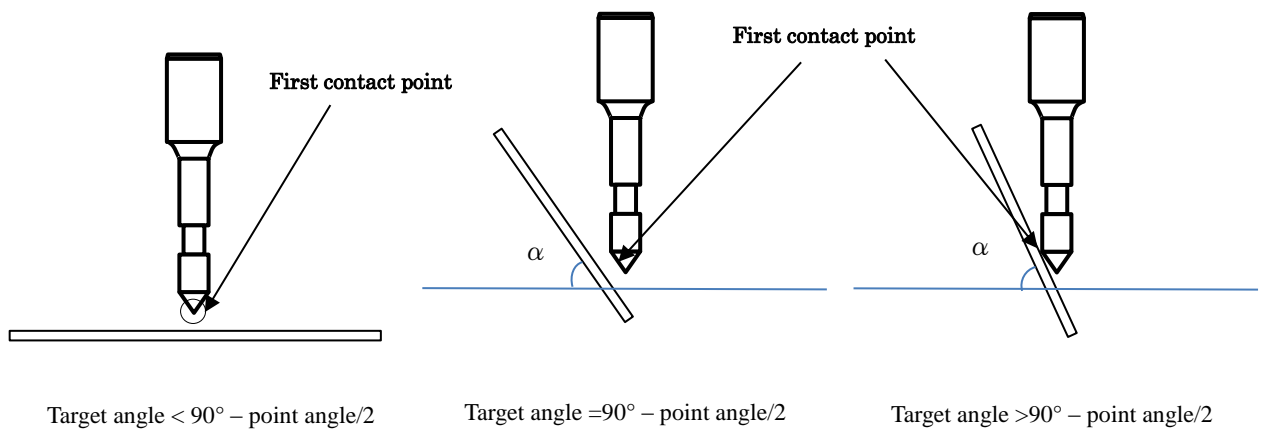


図 2.15 金属製銼の先端角度，ターゲット角度と最初の接触点

### 第3章 自由落下している供試板への撃ち込み試験

#### 3.1 試験の目的

自由落下中の供試板に金属製鉛を撃ち込む試験の目的は、供試板を固定した状態での撃ち込みに比べ、ターゲットの質量や慣性モーメントが小さくなった場合、必要な撃ち込み速度にどのような影響を及ぼすのか評価することである。本試験では、2種類の撃ち込み試験を行う：重心点への撃ち込み試験と重心点から5cmずらした位置への撃ち込み試験である。撃ち込み位置を重心からずらすことで、金属製鉛の撃ち込みにおける対象物の運動の影響を評価する。

#### 3.2 試験装置

##### 3.2.1 試験装置の概要

本試験では、空気銃式衝撃試験装置を用いて金属製鉛を自由落下中の供試板に向け射出する。試験装置の概要を図3.1に示す。供試板は固定台に取り付けられた2つの電磁石により固定されており、射出管先端から1.9mの位置に設置した光センサを金属製鉛が通過した時に電磁石への電流を遮断し、供試板を自由落下させる。

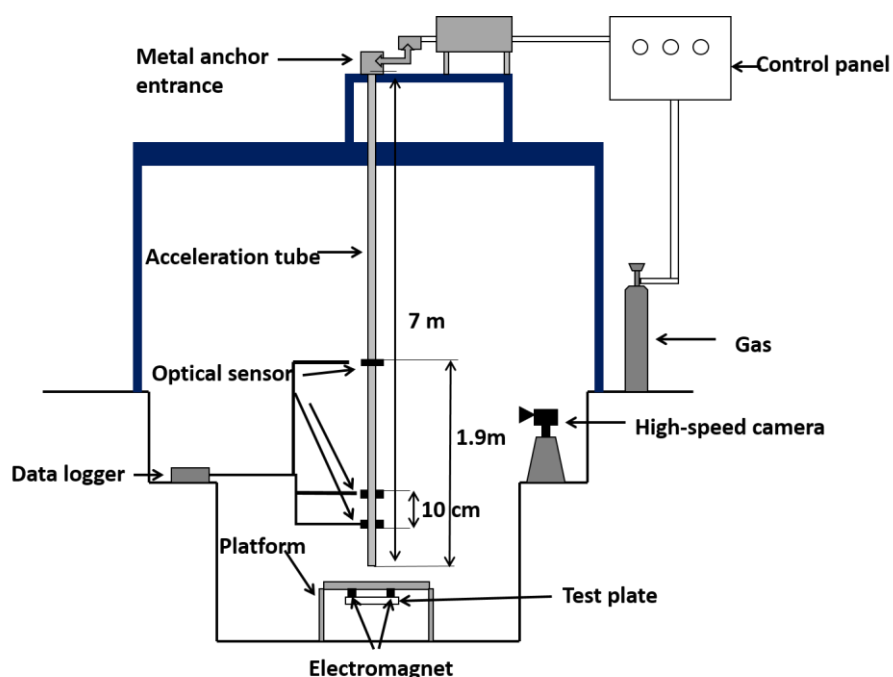


図 3.1 撃ち込み試験装置の概要

### 3.2.2 供試板

供試板を電磁石に固定するため、対頂点上に大きさ 30mm x 30mm の鉄板を図 3.2 のように接着する。また供試板への撃ち込み位置は重心または、重心から 5cm 離れた位置である。供試板の設置の様子を図 3.3 に示す。

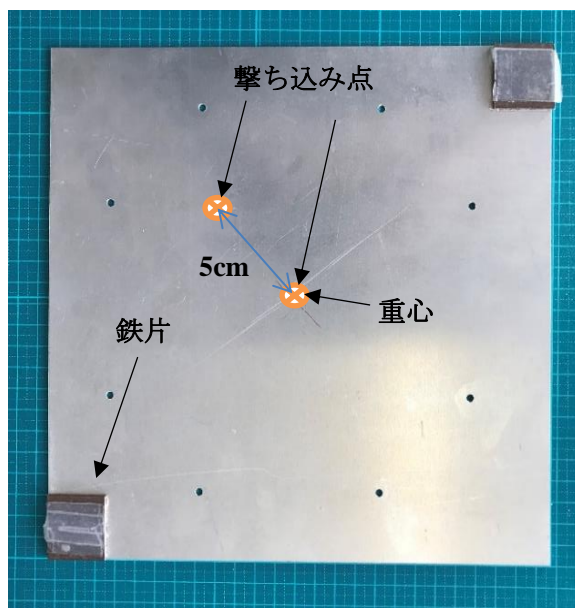


図 3.2 供試板の外観と撃ち込み位置

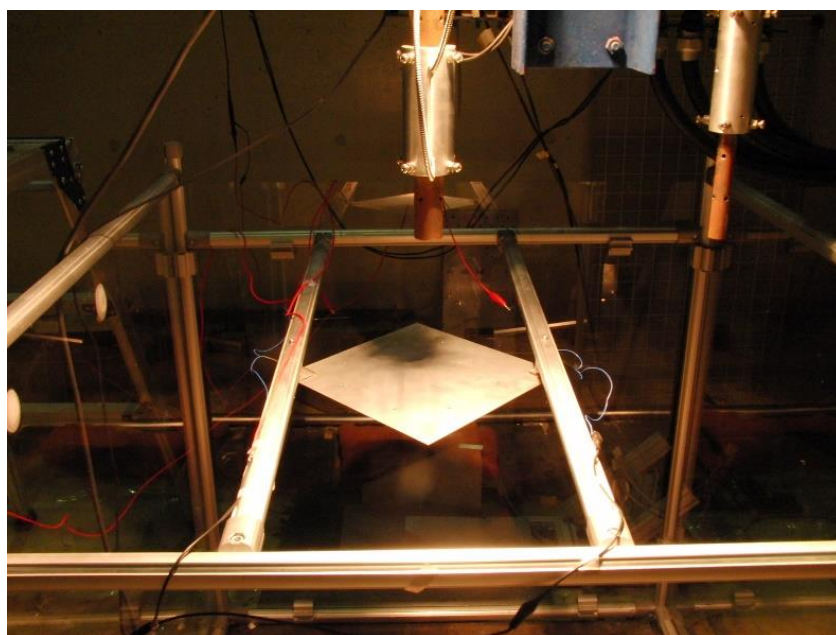


図 3.3 供試板設置の様子

### 3.2.3 供試板自由落下のための回路設計

本試験においては、金属製銚が衝突する時に供試板が自由落下している必要がある。よって、射出管の下端から 1.9m の位置に光センサを設置し、金属製銚が光センサを通過した際に電磁石に流れる電流を遮断する回路を図 3.4 に示すように設計した。金属製銚通過検知用の光センサに反応があると、リレー (QIANJI JQC-3F(T73)-12DVC) 回路によって電磁石 (電磁リフトホールディング 有線コネクタ電磁石 25N DC12V) に流れる電流が遮断される。また、速度計測用の 2 つの光センサにより金属製銚の速度を測定する。

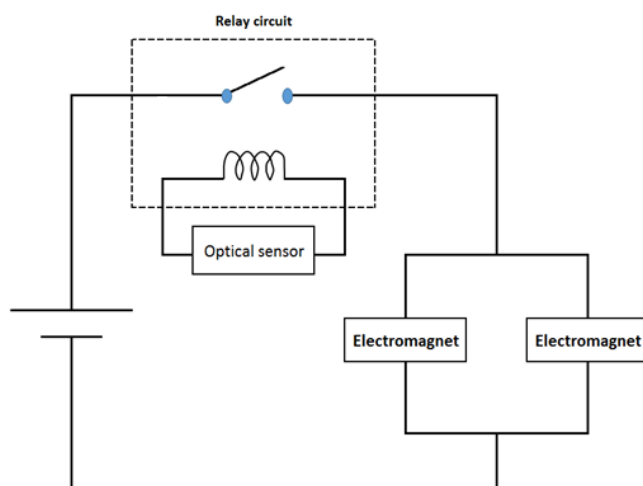


図 3.4 電磁石に流れる電流を遮断する回路の概要

### 3.2.4 リレーの反応速度の測定

供試板切り離し回路の特性を調べるため、データロガーを用いて、金属製銚が光センサを通過してから磁石に流れる電流が遮断されるまでの時間を測定した。測定の際の回路を図 3.5 及び図 3.6 に示す。この回路は光センサの反応により、リレーを用いて電磁石に流れる電流を遮断する回路である。データロガーを光センサと電磁石に取り付けることで、2 つの反応の時間差を求めた。10 回の測定の結果は表 3.1 となり、反応時間の平均値は 0.047s であった。



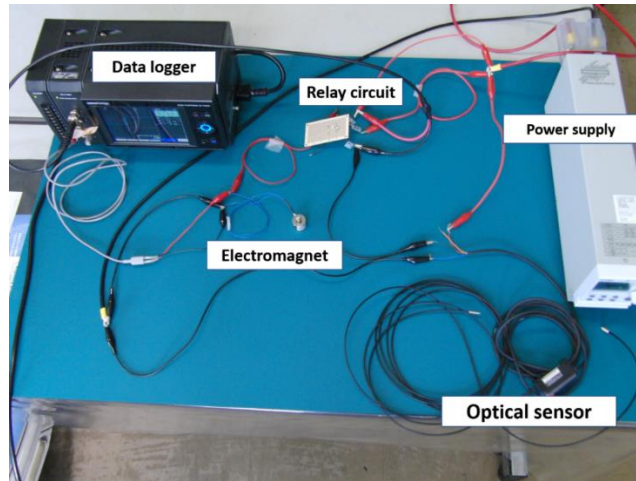


図 3.5 反応速度測定回路概要

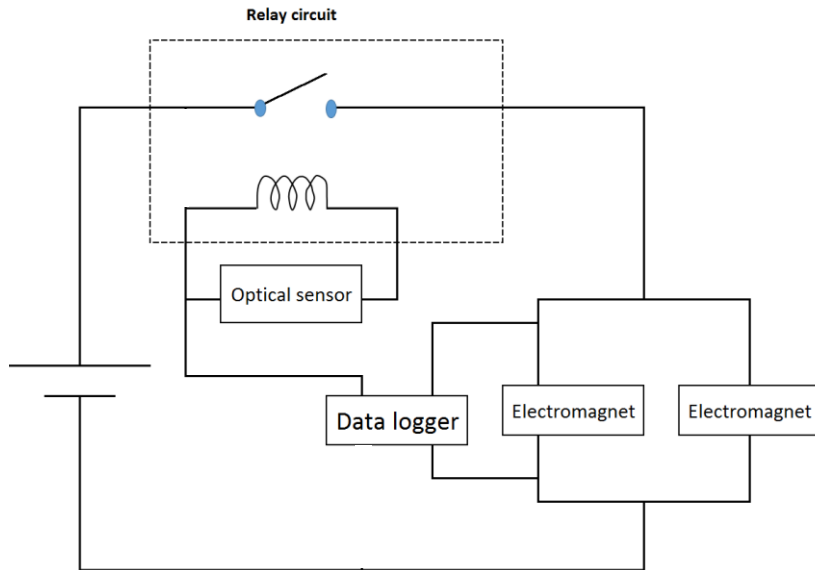


図 3.6 反応速度測定回路図

表 3.1 反応速度の測定結果

回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
反応時間( $10^{-2}$ s)	5.0	4.0	5.0	5.0	5.0	4.5	5.0	5.0	5.0	5.0

### 3.2.5 金属製銚の速度と自由落下状態の判定

光センサ設置可能範囲は試験装置の構成上、射出管の構造上、射出管先端から1.9mの位置である。前項3.2.4より反応速度は約0.047sであり、光センサと電磁石との距離が2.05mである。よって衝突時に供試板が自由落下しているための金属製銚の最大速度は、供試板に衝突する瞬間に電磁石に流れる電流が遮断されるタイミングとなり、約43m/sと算出でき、これが試験における上限速度となる。

金属製銚の速度が大きく、金属製銚が供試板に衝突する瞬間に電磁石と供試板が離れているかどうかは肉眼では確認できない。そのためデータロガーを用いて、速度測定用の光センサと電磁石にかかる電圧の反応を比較し、電磁石にかかる電圧が先に低下した場合、供試板は金属製銚と衝突前に自由落下をしているとした。例として、以下に2つのケースを示す。

図3.7は金属製銚の速度が29m/sの場合の電磁石にかかる電圧と速度測定用光センサの出力電圧を示しており、電磁石にかかる電圧が先に低下していることが分かる。よって、このケースでは金属製銚は自由落下中の供試板に衝突しているといえる。衝突前の供試体の自由落下速度を評価するために、供試板の自由落下開始から衝突までの時間を計る。この時間を図3.7から求めると約0.02sである。よって、供試板の衝突前の自由落下速度は以下のように求める。

$$v_{target} = g \times t = 9.8 \times 0.02 = 0.196(m/s)$$

この速度は金属製銚の撃ち込み速度と比べ十分に小さいため(約0.7%)以降の計算では無視できると考えられる。

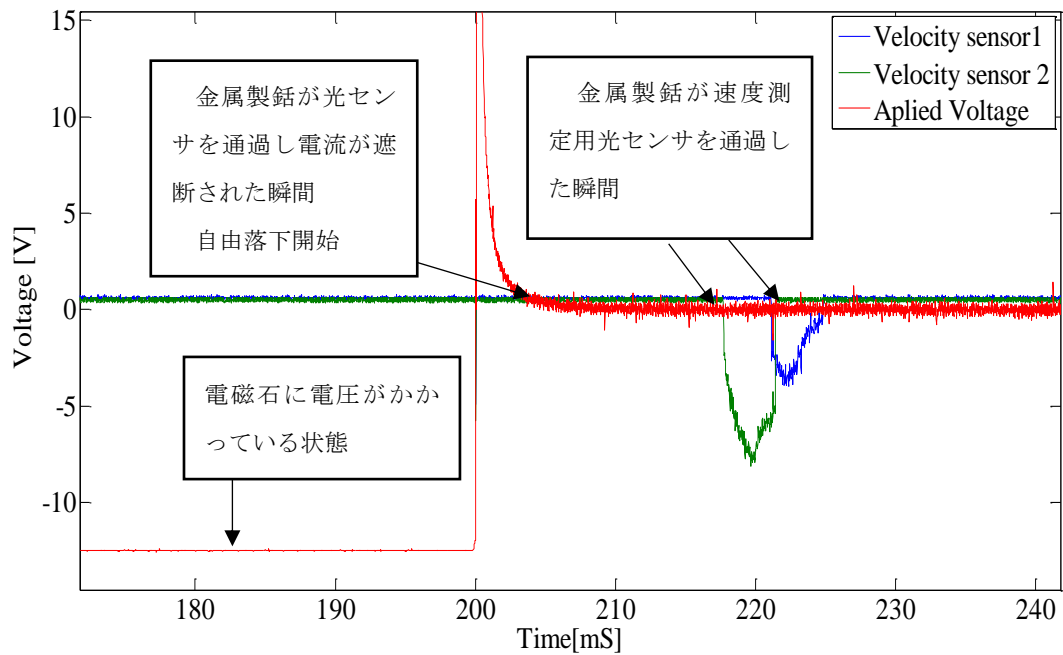


図 3.7 自由落下の判定の一例(撃ち込み速度は 29m/s)

図 3.8 は金属製銚の速度 45m/s の試験結果である。まず 200ms, 203ms で速度測定用光センサが反応している。その後、電磁石にかかる電圧が 0[V]になるのは 206ms である。そのため金属製銚が供試板衝突の際に磁力が作用している状態である。

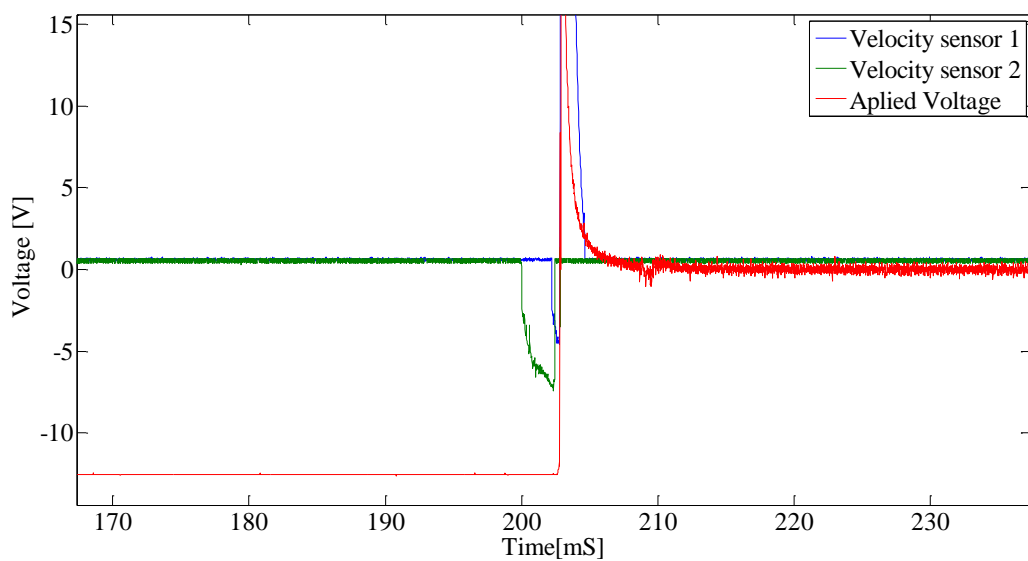


図 3.8 自由落下の判定の一例(撃ち込み速度は 45m/s)

### 3.3 試験結果

#### 3.3.1 金属製鉛撃ち込みの様子

図 3.9 は金属製鉛の撃ち込みの様子の一例を示しており，金属製鉛の速度は 9.8m/s である．(a)から(b)にかけて光センサが金属製鉛を検知し，電磁石に流れる電流が遮断され，供試板は自由落下を開始した．その後，供試板に金属製鉛が衝突した(c)．

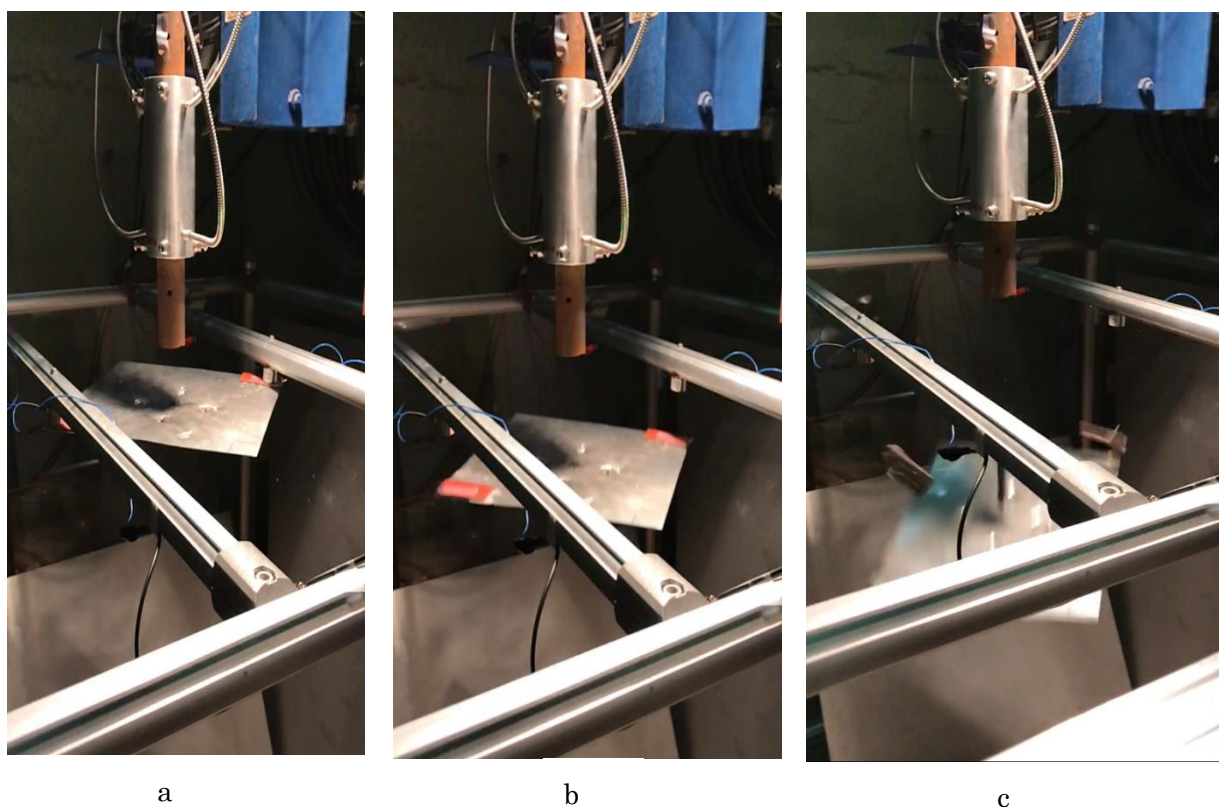


図 3.9 自由落下試験の様子

図 3.10 は速度 25m/s での撃ち込み試験である。(a)で衝突するが、撃ち込み速度が足りず金属製銚は貫入しなかった。その後、供試板と金属製銚は離れた(b)。供試板に回転などの運動はなかった。最終的に地面に落下した供試板の上に金属製銚が落下した(c)。

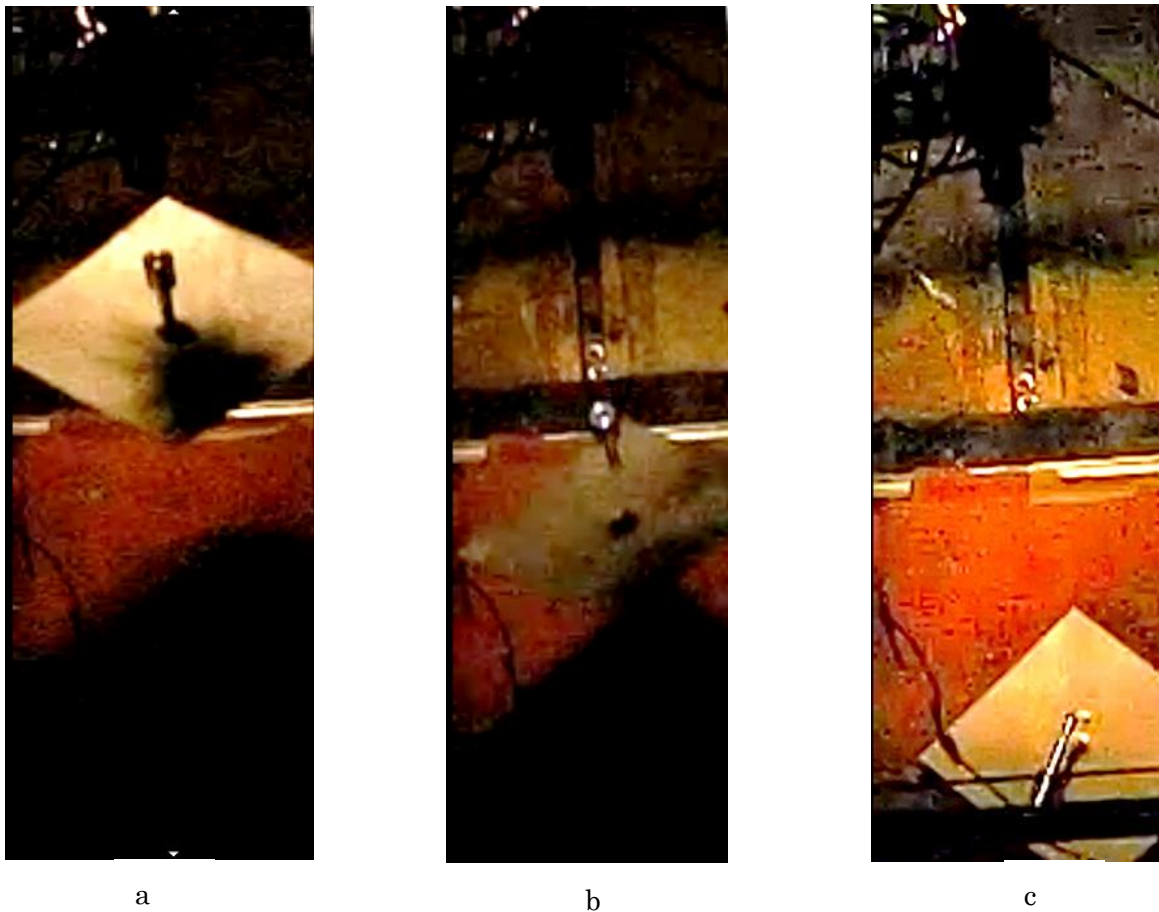


図 3.10 金属製銚撃ち込みの様子(重心へ撃ち込み：非貫入)

図 3.11 は速度 27m/s での撃ち込み試験である. (a)で衝突後, 金属製鉛は供試板に貫入した(b). この際回転運動はなかった. 地面に落下後も板は貫入状態のままであった(c).



a



b



c

図 3.11 金属製鉛撃ち込みの様子(重心へ撃ち込み : 貫入)



図 3.12 は速度 42.7m/s での撃ち込み試験である. (a)で衝突した後, 金属製鉛は供試板を貫通した(b). 供試板は回転運動がなかった. 供試板の変形が非貫入, 貫入に比べ大きかった. 貫通し地面に落下した金属製鉛の上に供試板が落下した(c).

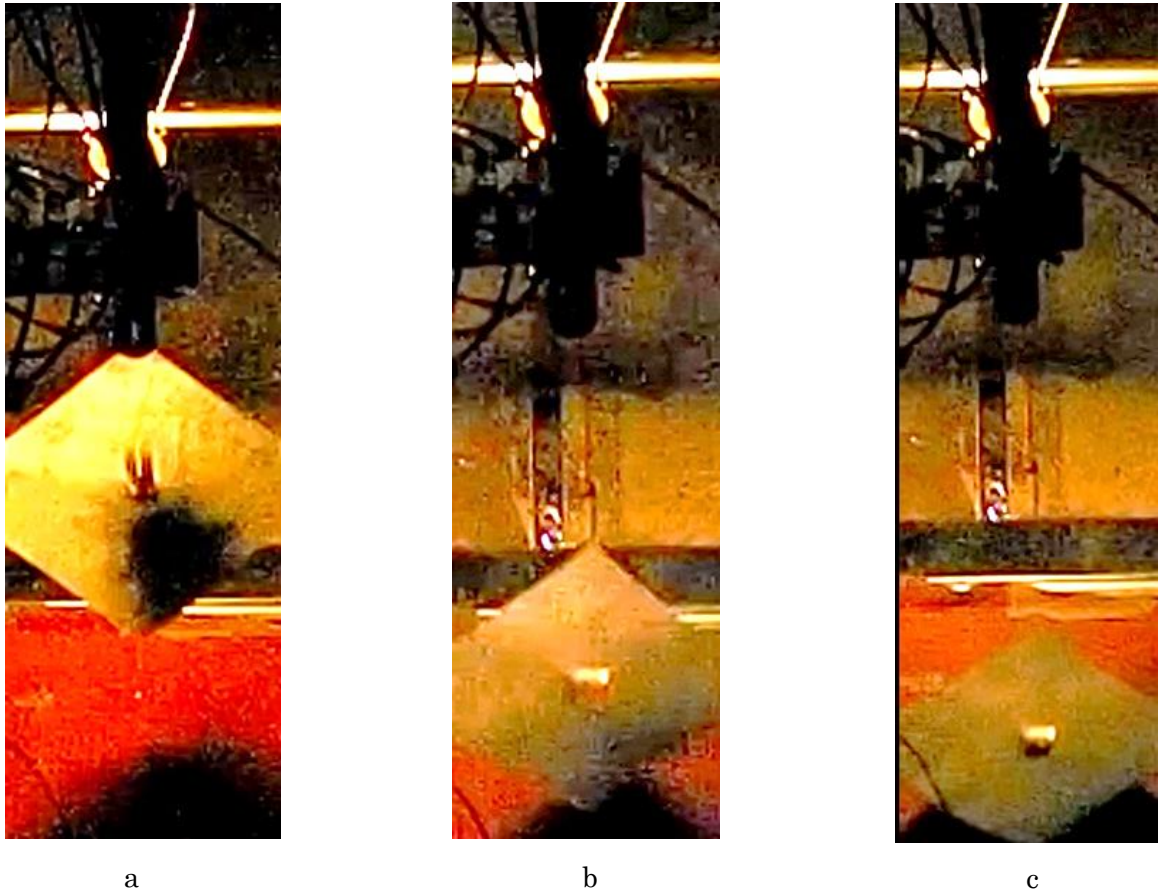


図 3.12 金属製鉛撃ち込みの様子(重心へ撃ち込み：貫通)

次に金属製鉛を板の重心から 5cm ずらした位置に撃ち込んだ。結果の 1 例(速度 33m/s)を図 3.13 に示す。(a)で衝突し、(b)で金属製鉛が供試板に貫入していることが確認できる。撃ち込み後の供試板は回転運動をしており、供試板が地面に着くまでに供試板は 180°回転した(c)。



図 3.13 金属製鉛撃ち込みの様子(重心からずれた位置への撃ち込み：貫入)



### 3.3.2 試験結果のまとめ

金属製鉛の撃ち出し圧力を調整し金属製鉛の速度を変えながら試験を行い、結合状態を確認した。試験結果を図 3.14, 図 3.15 に示す。供試板重心への撃ち込み試験では、金属製鉛の速度は 27m/s から 38m/s で貫入した。重心位置から 5cm ずらした位置への撃ち込みでは、29.2m/s 以上で貫入し、27m/s では貫入しなかった。速度が遅い場合は、供試板に刺さらず、速度が速すぎる場合は供試板を貫通した。図 2.11 に示す試験結果より、固定した供試体への撃ち込みの場合に比べ、自由落下中のターゲットへの撃ち込みでは最小貫入速度が大きい。これは固定条件の違いより、金属製鉛の運動エネルギーが貫入だけではなく、供試板の速度変化に使われるためであると考えられる。さらに衝突位置が重心から 5cm ずれていると最小貫入速度は 2m/s 大きくなった。しかし、これらの撃ち込みにおいても、貫入状態を得られる速度帯が存在することが確認できた。

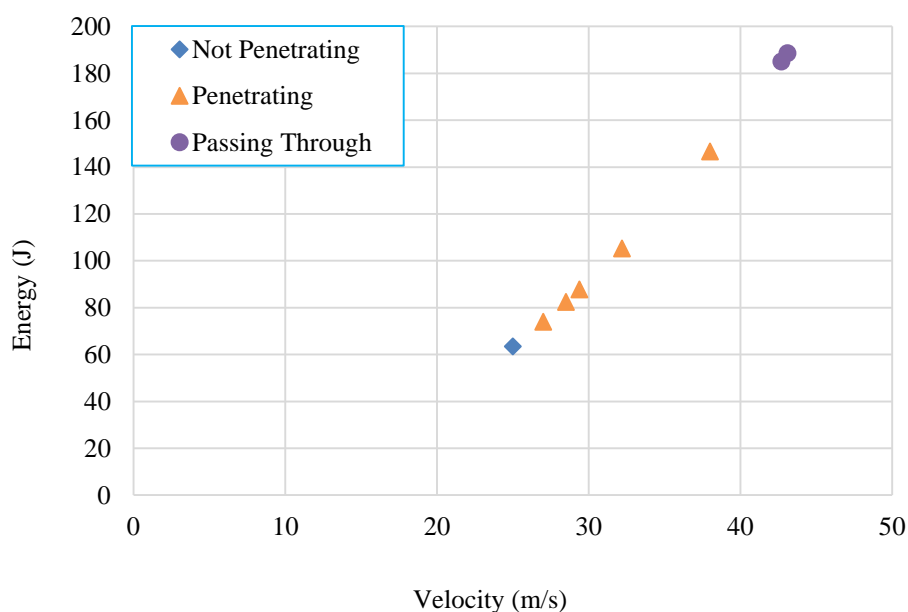


図 3.14 自由落下の試験結果(重心への撃ち込み)

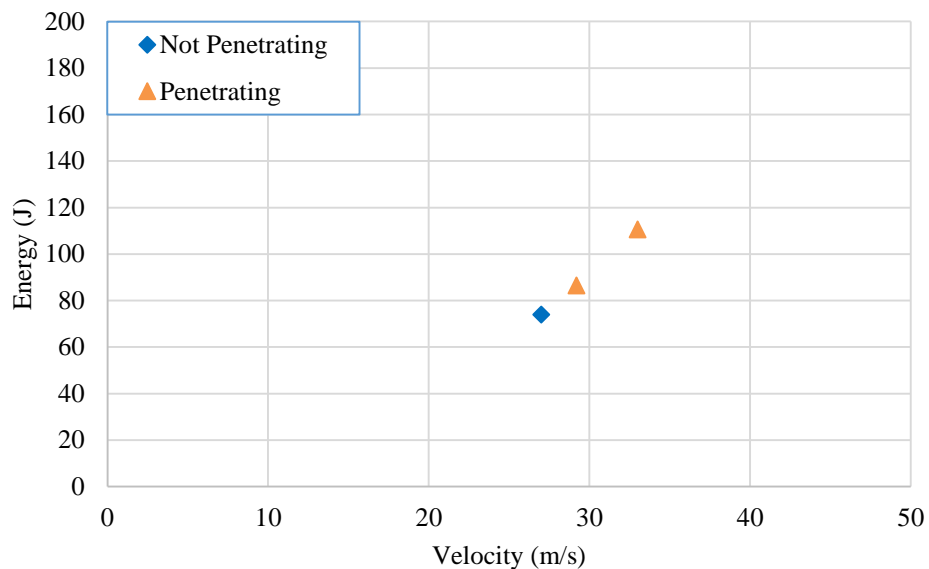


図 3.15 自由落下の試験結果(重心から 5cm 離れた点への撃ち込み)

### 3.4 非固定ターゲットでの最小貫入速度予測式の導出と妥当性評価

自由落下している供試板への撃ち込み試験では、リレーの反応速度や電磁石の力から、固定している供試板試験より検証できる条件に制約がある。そこで、この節では、固定している供試板への撃ち込み試験の最小貫入速度と自由落下している供試板の最小貫入速度の関係式を導出し、その有効性を評価する。この予測式により、自由落下中ターゲットへの撃ち込み試験における最小貫入速度を固定試験における最小貫入速度から予測することができると考えられる。自由落下中ターゲットへの撃ち込みの概要を図 3.16 に示す。

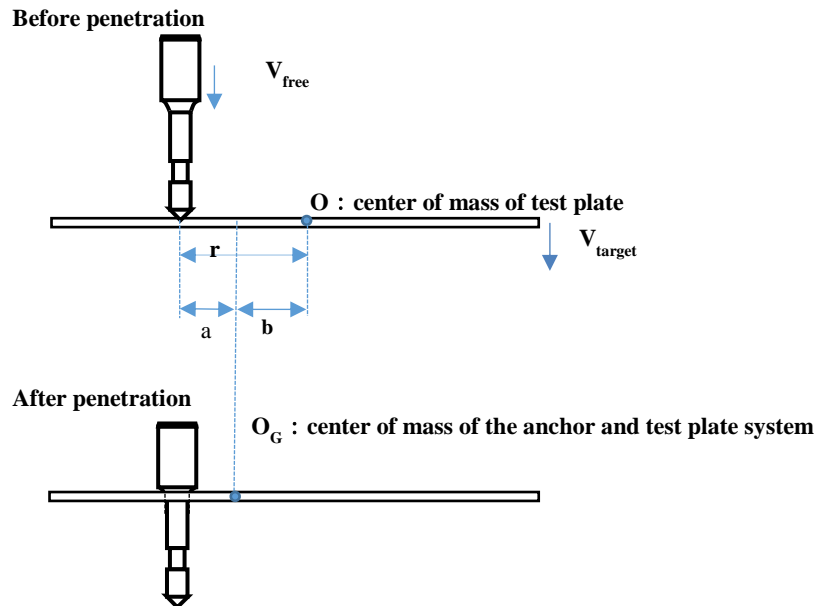


図 3.16 自由落下中ターゲットへの撃ち込みの概要図

ここで

- $m_1$  : 金属製銚の質量
- $m_2$  : 供試板の質量
- $v_{fix}$  : 固定ケースにおける最小貫入速度
- $v_{free}$  : 自由落下ケースにおける最小貫入速度
- $v_{target}$  : 供試体の撃ち込み前の速度
- $v_{total}$  : 金属製銚と供試板の撃ち込み後の速度
- $E_{trans}$  : 貫入するための必要なエネルギー
- $I$  : 供試板と金属製銚の総合慣性モーメント
- $I_p$  : 供試板の慣性モーメント
- $\omega$  : システムの角速度
- $a$  : 撃ち込み点から金属製銚・供試板システムの重心までの距離
- $b$  : 供試板の重心から金属製銚・供試板システムの重心までの距離
- $r$  : 撃ち込み点から供試板の重心までの距離

である。

固定しているケースにおいて、衝突前と衝突後のエネルギー保存則を適用すると、

$$\frac{m_1 v_{fix}^2}{2} = E_{trans} \quad (3.1)$$

であり、自由落下しているケースにおいて、衝突前と衝突後のエネルギー保存則を適用すると：

$$\frac{m_1 v_{free}^2}{2} + \frac{m_2 v_{target}^2}{2} = E_{trans} + \frac{(m_1 + m_2) v_{total}^2}{2} + \frac{I \omega^2}{2} \quad (3.2)$$

となる。

式(3.1)と(3.2)から、次の式を導出できる。

$$\frac{m_1(v_{free}^2 - v_{fix}^2)}{2} + \frac{m_2 v_{target}^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2)v_{total}^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} \quad (3.3)$$

ここで運動量保存則を適用すると、金属製銚・供試板の衝突後の速度を以下のように算出できる。

$$v_{total} = \frac{m_1 v_{free} + m_2 v_{target}}{(m_1 + m_2)} \quad (3.4)$$

式(3.3)と(3.4)から、次の式を導出できる。

$$\frac{m_1(v_{free}^2 - v_{fix}^2)}{2} + \frac{m_2 v_{target}^2}{2} = \frac{(m_1 v_{free} + m_2 v_{target})^2}{2 \times (m_1 + m_2)} + \frac{I\omega^2}{2} \quad (3.5)$$

また、角度運動量の保存則は次のように表せる。

$$m_1 \times v_{free} \times a + m_2 \times v_{target} \times b = I \times \omega \quad (3.6)$$

次に、金属製銚・供試板系における距離  $a$ 、 $b$  は次のように求まる。

$$m_1 \times a = m_2 \times b, \quad a + b = r$$

$$a = \frac{r \times m_2}{(m_1 + m_2)} \quad b = \frac{r \times m_1}{(m_1 + m_2)} \quad (3.7)$$

式(3.5)の  $I \times \omega^2$  は(3.6)、(3.7)より次のように表せる。

$$I \times \omega^2 = \frac{I^2 \times \omega^2}{I} = \frac{(m_1 m_2 r (v_{free} + v_{target}))^2}{I(m_1 + m_2)^2} \quad (3.8)$$

式(3.5)と(3.8)から、次の式が得られる。

$$m_1(v_{free}^2 - v_{fix}^2) + m_2 v_{target}^2 = \frac{(m_1 v_{free} + m_2 v_{target})^2}{(m_1 + m_2)} + \frac{(m_1 m_2 r (v_{free} + v_{target}))^2}{I(m_1 + m_2)^2} \quad (3.9)$$

式(3.9)を変形すると

$$\begin{aligned} & [m_2(m_1 + m_2)I - m_1 m_2^2 r^2] v_{free}^2 - 2[v_{target} m_2 ((m_1 + m_2)I + m_1 m_2 r^2)] v_{free} + \\ & [v_{target}^2 (m_2(m_1 + m_2)I - m_1 m_2^2 r^2) - v_{fix}^2 (m_1 + m_2)^2 I] = 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

となる。

$v_{free}$  を二次方程式 (3.10) で解くと次のように求まる。

$$v_{free} = \frac{v_{target} m_2 [(m_1 + m_2)I + m_1 m_2 r^2]}{m_2 (m_1 + m_2)I - m_1 m_2 r^2} + \sqrt{\frac{v_{fix}^2 (m_1 + m_2)^2 I}{m_2 (m_1 + m_2)I - m_1 m_2 r^2} - v_{target}^2 + \left[ \frac{v_{target} ((m_1 + m_2)I + m_1 m_2 r^2)}{(m_1 + m_2)I - m_1 m_2 r^2} \right]^2} \quad (3.11)$$

式(3.11)を変形すると

$$v_{free} = \frac{v_{target} m_2 [(m_1 + m_2)I + m_1 m_2 r^2]}{m_2 (m_1 + m_2)I - m_1 m_2 r^2} + \sqrt{\frac{v_{fix}^2 (m_1 + m_2)^2 I}{m_2 (m_1 + m_2)I - m_1 m_2 r^2} + \frac{4v_{target}^2 (m_1 + m_2) m_1 m_2 I r^2}{((m_1 + m_2)I - m_1 m_2 r^2)^2}} \quad (3.12)$$

となる。

式(3.12)を使うと、自由落下ケースにおける貫入速度が固定ケースにおける貫入速度から予測できる。

衝突前の供試体の自由落下速度を評価するために、供試板の自由落下開始から衝突までの時間を計る。撃ち込み速度が 29m/s の場合、この時間を図 3.7 から求めると約 0.02s である。よって、供試板の衝突前の自由落下速度は以下のように求める。

$$v_{target} = g \times t = 9.8 \times 0.02 = 0.196(m/s)$$

この速度は金属製銚の撃ち込み速度と比べ十分に小さいため(約 0.7%) 式(3.12)から省略すると

$$v_{free} = v_{fix} \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)^2 I}{m_2 (m_1 + m_2)I - m_1 m_2 r^2}} \quad (3.13)$$

となる。

式(3.13)を変形すると

$$\frac{v_{fix}}{v_{free}} = \sqrt{\frac{m_2}{(m_1 + m_2)} - \frac{m_1 \times m_2^2 \times r^2}{(m_1 + m_2)^2 I}} \quad (3.14)$$

となる。

ここで、金属製銚・供試板の慣性モーメントは次のように表せる。

$$I = I_p + m_2 \times b^2 = I_p + \frac{m_2 \times m_1^2 \times r^2}{(m_1 + m_2)^2} \quad (3.15)$$

式(3.14)と(3.15)から、次の式を導出できる。

$$\frac{v_{fix}}{v_{free}} = \sqrt{\frac{m_2}{(m_1 + m_2)} - \frac{m_1 \times m_2^2 \times r^2}{I_p \times (m_1 + m_2)^2 + m_2 \times m_1^2 \times r^2}} \quad (3.16)$$

式(3.16)を使うと、本試験での自由落下ケースにおける最小貫入速度が固定ケースにおける最小貫入速度から予測できる。正確な最小貫入速度は試験で実施した中での最大非貫入速度から最小貫入速度までの範囲に入っていると考えられるため、その範囲として評価した。表 3.2 より、試験結果と予測結果はよく一致しており、導出した予測式は妥当であると言える。

表 3.2 試験結果と導出した式からの予測結果

Type of value	Fixed Target	Free Falling Target (impact point is target's center of mass)	Free Falling Target (distance between impact point and target's center of mass is 5cm)
Experimental value (m/s)	16.9-18.7	25.0-27.2	27.1-29.2
Estimated Value (m/s)	—	24.2-26.8	25.8-28.6

### 3.5 結論

本研究では、自由落下している供試板に対する撃ち込み試験装置を開発し、撃ち込み試験を行った。固定している供試板、自由落下している供試板（撃ち込み点は供試板の重心、重心から 5cm ずれる点）への撃ち込み試験を行い、得られた結果を考察した。全てのケースにおいて、金属製銚が供試板に適切に貫入する撃ち込み速度区間が存在することが確認できた。固定している供試板より自由落下している供試板への最小貫入速度の方が大きく、また撃ち込み点から供試板の中心までの距離の上昇に伴い、最小貫入速度が上昇する。撃ち込み後の試験板の変形形状に関しては、固定ターゲットよりも自由落下ターゲットの方が周辺部の変形が少し大きくなったものの、大きさ差異は見られなかった。固定ターゲットの場合の最小貫入速度と自由落下ターゲットの場合の最小貫入速度の関係式を導出し、試験結果と比較することによって、その妥当性を示した。

## 第4章 金属製銹の撃ち込みに関する数値解析

### 4.1 数値解析の目的

撃ち込み試験では、試験装置の制約のため、様々な条件での撃ち込みを実施することは不可能である。そこで、前節で行った固定された供試板と自由落下する供試板への撃ち込み試験の結果に基づき、数値解析モデルを構築することによって、様々な撃ち込み条件について評価できると考えられる。なお、スペースデブリに使用する材料の粘塑性特性が打ち上げる前に調べられていれば、そのパラメータが使用できるが、通常、そのような粘塑性特性は調べられないため、正確な粘塑性のパラメータは未知である。そのため、本研究では過去の金属加工等の研究で求められているアルミニウム合金板 A2024-T3 の構成モデルのパラメータを使用し、本研究の実験結果と比較することによって、その適用性と実用時に考慮すべき評価誤差の大きさを見積もる。なお解析は汎用衝撃解析ソフト ANSYS WORKBENCH 15.0 (ソルバー：AUTODYN) を用いた。

### 4.2 数値解析の材料モデル

本解析では、材料モデルとして一つの2等方直線モデル(BIHモデル)と三つのJohnson-Cookモデル(JCモデル)を使い、その適用性を評価する。なお各パラメータは過去の研究から引用した。アルミニウム合金 A2024-T3 の材料の一般的なパラメータを表4.1に示す。

表 4.1 アルミニウム合金 A2024-T3 の一般パラメータ

Density (kg/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus (GPa)	Poison ratio
2700	73	0.33

次に A12024-T3 の2等方直線モデルの破壊パラメータを表4.2に示す。

表 4.2 2等方直線モデルのパラメータ<sup>23)</sup>

Yield stress (MPa)	Tangent modulus (MPa)
300	1200

JC モデルは 80 年代ごろに発展し<sup>24)</sup>、現在では、衝撃や貫入問題を評価するために多くの研究で使用される。JC モデルは材料試験結果に基づき、次の式で表される。

$$\sigma = [A + B \varepsilon_p^n] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (4.1)$$

JC モデルは JC 破壊モデルと組み合わせることにより、破壊条件を作ることができる。

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \frac{p}{\sigma}] \left[ 1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[ 1 + D_5 \frac{(T - T_0)}{(T_m - T_0)} \right] \quad (4.2)$$

ここで

$A$	: 初期降伏応力
$B$	: 硬化定数
$n$	: 硬化指数
$\sigma$	: 相当塑性応力
$\varepsilon_p$	: 相当塑性ひずみ
$\varepsilon_0$	: 参照ひずみ
$C$	: ひずみ速度定数
$T$	: 材料温度
$T_m$	: 融点
$T_0$	: 参照温度
$m$	: 熱軟化定数
$\varepsilon_f$	: 破壊ひずみ
$p$	: 平均応力
$D_1 - D_5$	: 破壊定数

である。

近年、金属加工などの研究において、JC モデルによりアルミニウム合金 2024-T3 の変形と破壊が評価されている<sup>25,26)</sup>。実際に、スペースデブリに使う材料の粘塑性特性は通常、打ち上げ前に評価されていないため、デブリ構造における正確な粘塑性パラメータについては未知である。そのため、本研究では、過去の研究で異なる目的で使用した三つの JC モデルを使用し、試験の結果と比較することにより、その適用性を検討するとともに、実用時に考慮すべき誤差量を見積も



る。本解析で用いる JC モデルのパラメータを表 4.3 に示す。なお本研究で対象とする撃込み現象では 700~1000 (sec<sup>-1</sup>)程度のひずみ速度となる。

表 4.3 J-C モデルのパラメータ <sup>25,26)</sup>

Parameter Model	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>
JC model 1	352	440	0.42	0.0083	1	0.13	0.13	-1.5	0.011	0
JC model 2	369	684	0.73	0.0083	1.7	0.13	0.13	-1.5	0.011	0
JC model 3	265	426	0.34	0.015	1	0.13	0.13	-1.5	0.011	0

### 4.3 数値解析の評価

#### 4.3.1 メッシュタイプとサイズの決定

数値解析において有効なメッシュサイズを決定するために、サイズの異なる四角形のメッシュと三角形のメッシュを使用し、評価する。四角メッシュの節点数は 8 であり、三角メッシュの接点数は 6 である。利用する材料モデルとして、JC モデル 3 を使用する。金属製銚も弾性体として解析を実施した。メッシュサイズを 8mm から細かくし、供試板の変形と最小貫入速度を評価した。各メッシュサイズにおける固定ターゲットへの撃ち込み時の最小貫入速度を図 4.1, 4.2 に示す。固定条件としては供試板の周りの 4 辺を完全固定とする。接触条件に関しては、各物体（銚、試験板）の自己接触および要素の自己接触を考慮する形として、摩擦はなしとする。各メッシュタイプにおける供試板の貫入時における変形を図 4.3, 4.4, 実際の供試板の変形を図 4.5 に示す。撃ち込んだ後の供試板の変形に関して、すべてのケースで、撃ち込み場所以外では、大きな変形が見られなかった。また、メッシュサイズの低減に伴い、供試板の撃ち込みにより発生する穴の直径が小さくなり、メッシュサイズ 1mm では穴の直径 14mm 程度となる。これは試験結果（13mm）とほぼ同程度であった。最小貫入速度に関して、グラフから、メッシュサイズの低減に伴い、貫入速度が小さくなり、三角形メッシュと四角メッシュのメッシュサイズ 1mm において速度が収束した。そこで、以降の解析では、メッシュサイズを 1mm とする。

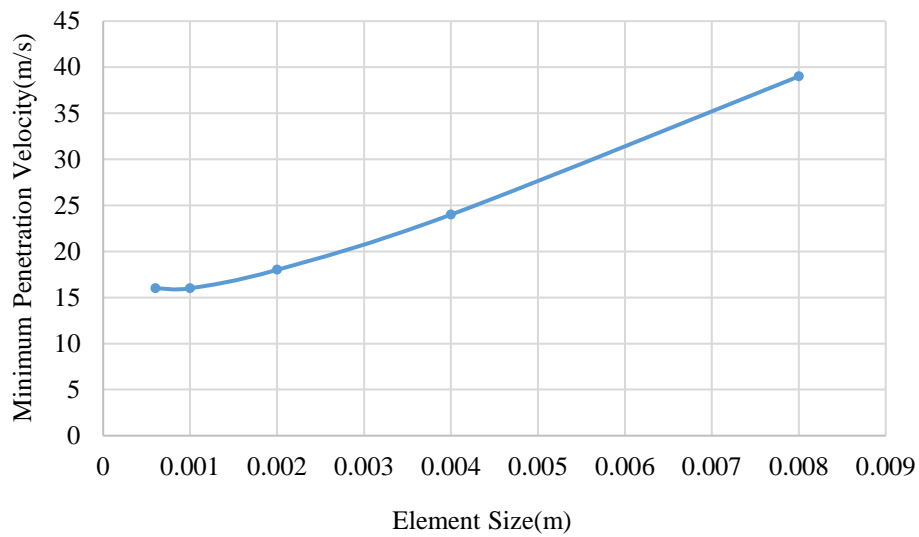


図 4.1 四角形メッシュのメッシュサイズにおける最小貫入速度

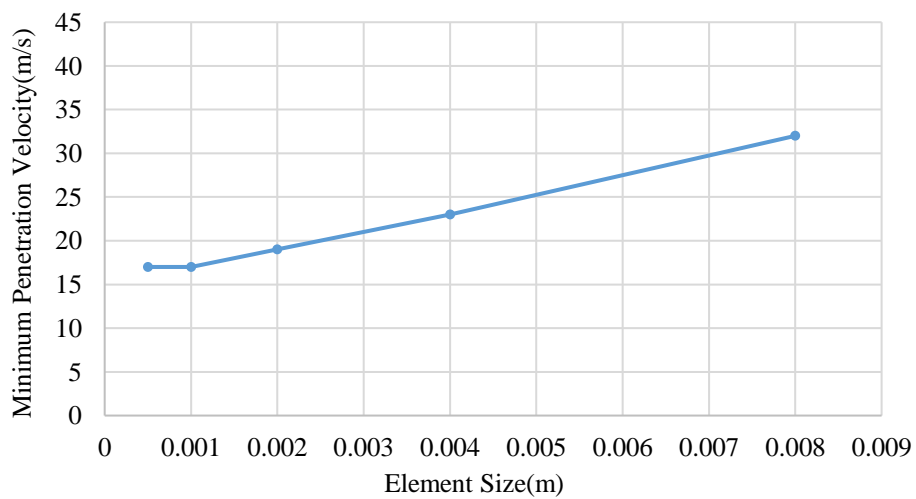
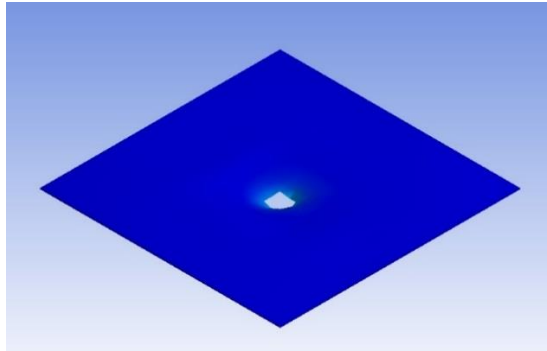
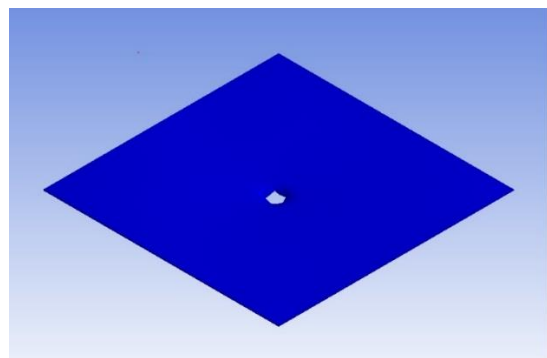


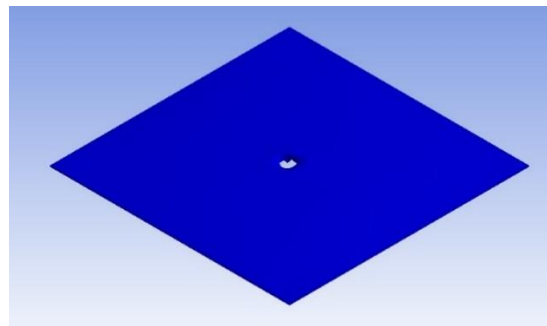
図 4.2 三角形メッシュのメッシュサイズにおける最小貫入速度



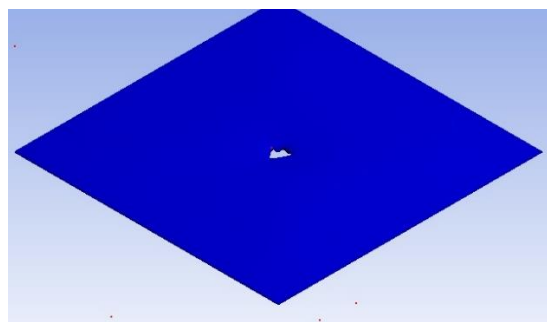
メッシュサイズ=8mm(撃ち込み速度：39m/s)



メッシュサイズ=4mm(撃ち込み速度：24m/s)

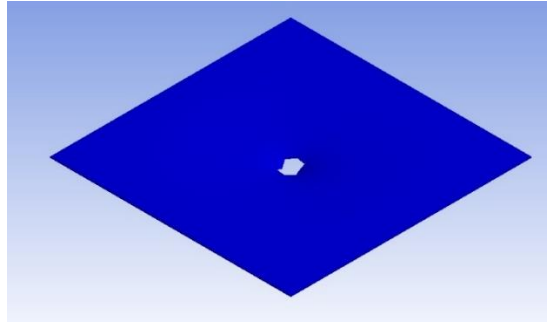


メッシュサイズ=2mm(撃ち込み速度：18m/s)

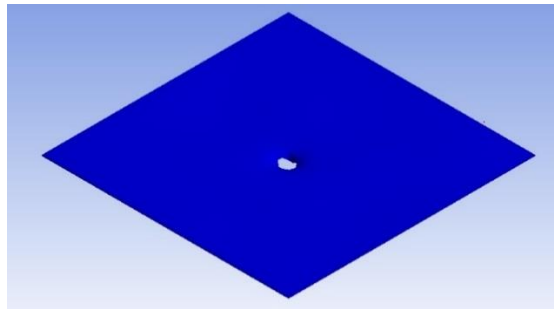


メッシュサイズ=1mm(撃ち込み速度：16m/s)

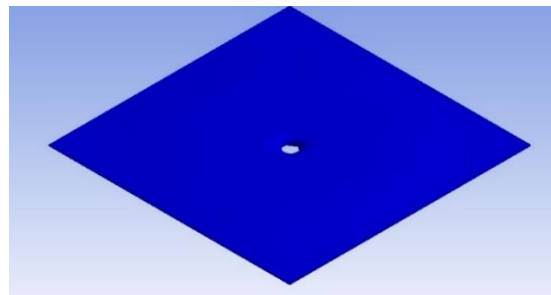
図 4.3 四角形メッシュの場合の供試板の変形 (撃ち込み速度は最小貫入速度)



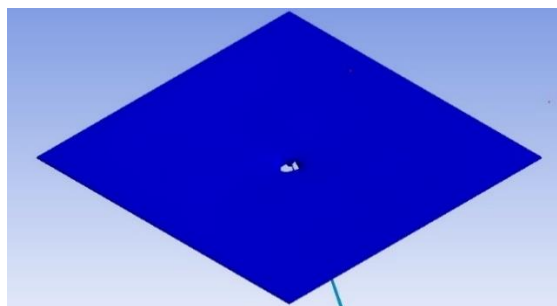
メッシュサイズ=8mm(撃ち込み速度：32m/s)



メッシュサイズ=4mm(撃ち込み速度：23m/s)



メッシュサイズ=2mm(撃ち込み速度：19m/s)



メッシュサイズ=1mm(撃ち込み速度：17m/s)

図 4.4 三角形メッシュの場合の供試板の変形(撃ち込み速度は最小貫入速度)

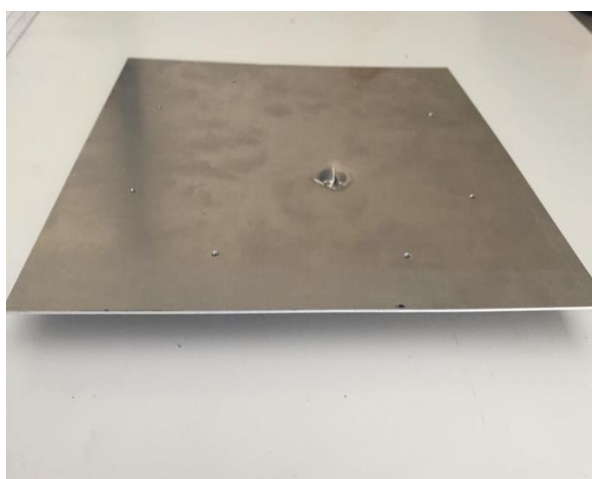
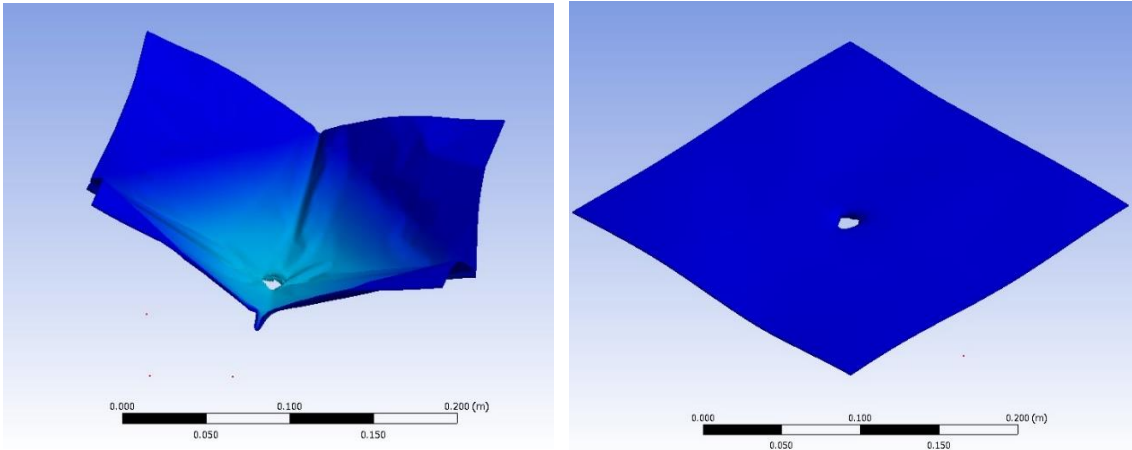


図 4.5 供試板の貫入後の変形(撃ち込み速度は 18.7m/s)

次に自由落下中の撃ち込みに関して、四角形のメッシュと三角形のメッシュを使った解析を行い、結果を評価する。メッシュサイズは 1mm である。各メッシュタイプにおける最小貫入速度を表 4.4 に、供試板の撃ち込み後の変形を図 4.6 に示す。表 4.4 と図 4.6 から、両方とも最小貫入速度が試験結果との誤差が小さいが、供試板の変形に関しては三角形メッシュを使った方が実験時の供試板全体の変形(図 4.7 に示す)と近い形状であったため、以降の解析に関して、三角形メッシュを用いることとする。

表 4.4 数値解析の各メッシュタイプにおける最小貫入速度(自由落下の場合)

Model	Minimum penetration velocity (m/s)	Error relative to experimental result
Experiment	26.1	—
Simulation(Triangle Mesh)	25.0	4%
Simulation(Quadrangle Mesh)	27.0	3%



四角形のメッシュ(撃ち込み速度：27m/s)      三角形のメッシュ(撃ち込み速度：25m/s)

図 4.6 数値解析の各メッシュタイプにおける供試板の変形  
(自由落下中の場合)

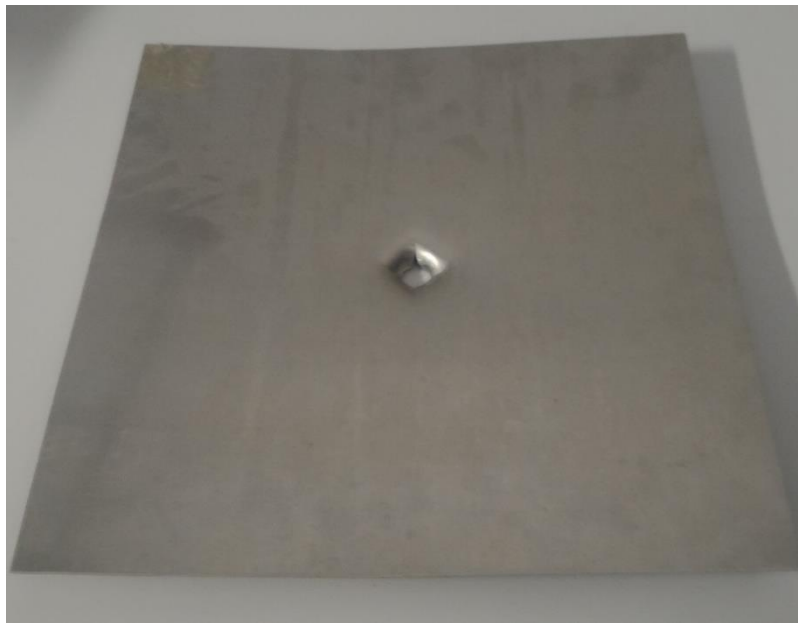


図 4.7 自由落下試験の供試板の変形(撃ち込み速度:27.2m/s)

なお、撃ち込み点近傍以外では変形が小さいため、計算コストの低減を目指しメッシュサイズを中心から離れるに従い徐々に大きくすることとする。以降で用いる解析モデルを図 4.8 に、金属製銚の数値解析モデルを図 4.9 に示す。

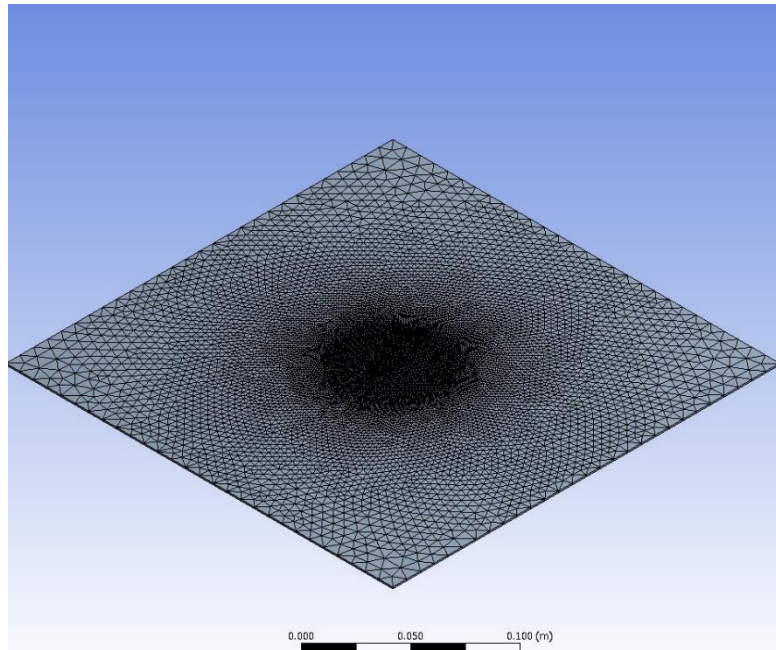
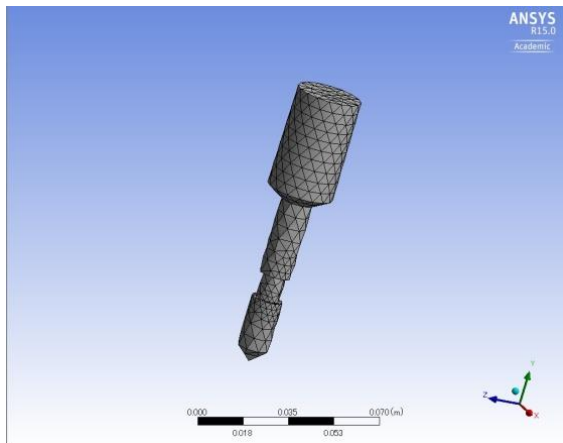
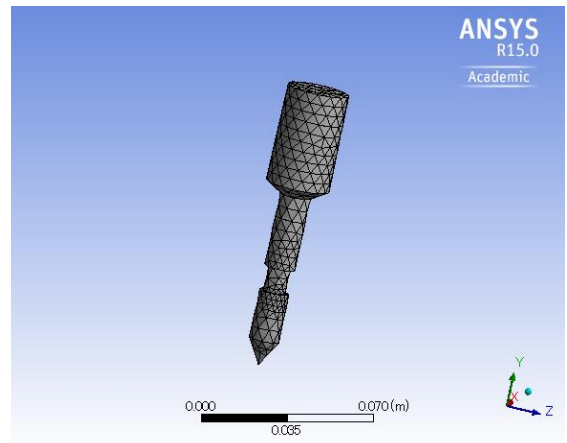


図 4.8 供試板の数値解析モデル（節点数：16785，要素数：18297）



金属製鈎 1



金属製鈎 2

図 4.9 金属製鈎の数値解析モデル

#### 4.3.2 数値解析の適用性評価

次に、決定したメッシュを 4 タイプの材料モデルと組み合わせ、数値解析を行い、試験結果と比較する。なお、正確な最小貫入速度は試験で実施した中で最大の非貫入速度から最小貫入速度までの範囲に入っていると考えられる。そこで、本解析では、試験の比較値として、試験結果で得られた最大非貫入速度と

最小貫入速度の平均値を用いる。まず、金属製鉛 1 を 0°の傾き角度で設置したターゲットに撃ち込むケースについて評価を行う。シミュレーション結果を表 4.5 に示す。表 4.5 から、供試板の傾き角度が 0°の時、試験結果に対する JC モデル 1,2,3 の誤差は小さく(5%以下)、BIH モデル誤差は他モデルよりもかなり大きい。この原因として、本試験で取り扱う現象では、ひずみ速度依存性を考慮する必要があるが、BIH モデルでは、ひずみ速度依存性を再現できないため、数値解析誤差が JC モデルと比べ大きかった。

次に、2つの金属製鉛による様々な傾き角度と自由落下中ターゲットへの撃込みに対して、JC モデル 1,2,3 を用いた数値解析を行った結果を図 4.10, 4.11 と表 4.6 に示す。数値解析の結果、3セットの JC モデルのパラメータとも、10%以下の誤差で収まることが分かった。JC モデル 2 と 3 の結果を比較すると、パラメータ C (ひずみ速度定数) と m (熱軟化定数) は貫入速度にほとんど影響しないことがわかる。パラメータ A (初期降伏応力)、B (硬化定数)、n (硬化指数) に関しては、3セットの JC モデルで異なるが、ひずみが小さい場合、これらのパラメータ A, B, n が作る式(4.1)の傾きはほぼ同じとなる。これが、3つのモデルによって得られた結果がほぼ同じであった理由と考えられる。これらの結果から、これらの JC モデルは、最小貫入速度の予測において 10%程度の誤差で適用可能であると考えられる。従って、実際のスペースデブリ除去ミッションに必要な最小貫入速度を予測するには、10%程度のマージンを設定しなければならないが、このマージン (約  $0.1 \times 30 \text{ [m/s]} = 3 \text{ m/s}$ ) は、先の実験で得られた貫入を実現する速度範囲に比べて十分小さく、解析モデルの有効性を示せたと言える。

表 4.5 固定された供試板の正面に撃ち込む場合の実験と数値解析における結果(金属製鉛 1)

Model	Minimum penetration velocity (m/s)	Error relative to experimental result
Experimental	17.8	—
BIH	50.0	180%
JC model 1	18.0	2%
JC model 2	18.0	2%
JC model 3	17.0	5%



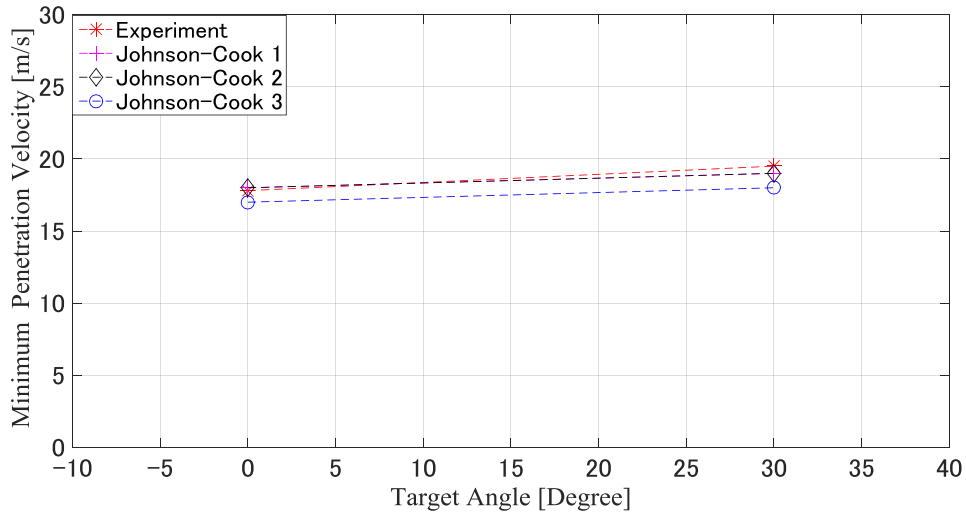


図 4.10 固定ターゲットの場合の数値解析結果 (金属製鉛 1)

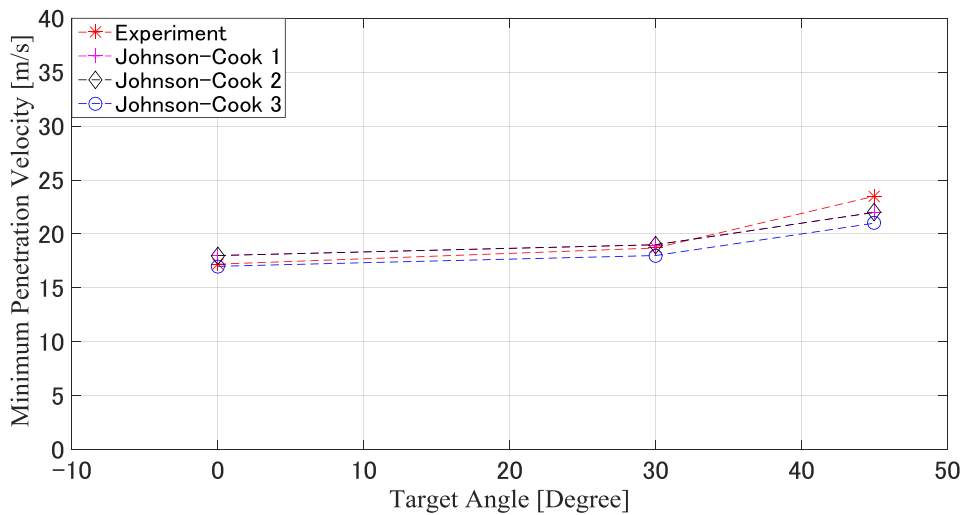


図 4.11 固定ターゲットの場合の数値解析結果 (金属製鉛 2)

表 4.6 自由落下中の供試板の正面に撃ち込む場合の実験と数値解析における結果(金属製鉛 1)

Model	Minimum penetration velocity (m/s)	Error relative to experimental result
Experimental	26.1	—
JC model 1	26.0	1%
JC model 2	26.0	1%
JC model 3	25.0	4%

#### 4.4 金属製銚の先端角度と供試板の傾き角度の影響評価

撃ち込み試験では、供試板の傾き角度が小さい場合に最小貫入速度を測定することができるが、傾き角度が大きい場合、試験装置の制約のために、最小貫入速度を評価することが困難になる。そこで本節では、先に妥当性を確認した JC モデルを用いてターゲットの傾き角度を変化させた際の数値解析を行うことにより、金属製銚先端角度と試験板の傾き角度の貫入に及ぼす影響をより詳しく評価する。この解析では、先の評価において誤差が小さかった JC モデル 1 を使用する

金属製銚 1 と金属製銚 2 の数値解析結果を図 4.12 に示す。図 4.12 より、傾き角度が大きくなると、金属製銚の先端角度にかかわらず、最小貫入速度が増加することが分かる。金属製銚 1 の場合、ターゲット角が  $45^\circ$  になるまで最小貫入速度が増加し、ターゲット角が  $45^\circ$  以上になると、金属製銚は最小貫入速度でアルミ合金板を貫通する。これはターゲットの傾き角度の余角が金属製銚 1 の先端角度  $90^\circ$  の半分であるため、金属製銚の先端がアルミ合金板に接触するのとほぼ同時に、金属製銚先端の斜面部がアルミ合金板に接触してしまい、貫入状態を作れなかったためと考えられる。図 4.13 は金属製銚が最小貫入速度でターゲットに貫通した場合の数値解析の様子の一例である。当初、金属製銚の先端はターゲットに接触し、滑りながら、ターゲットに貫入する。その後、金属製銚の根元もターゲットに当たり、金属製銚はターゲットを貫通してしまう。金属製銚 2 の場合、傾き角度が  $60^\circ$  においてターゲットの傾き角度の余角が金属製銚の先端角度の半分に等しいため、同様の現象が発生する。供試板の傾き角度が  $60^\circ$  よりも小さい場合、金属製銚 2 の最小貫入速度は金属製銚 1 よりも小さかった。これらの解析結果から、ターゲットの傾き角度の余角が金属製銚先端の角度の半分よりも小さい場合、金属製銚の貫入性が低くなることが分かる。また、このような場合には、金属製銚が最小貫入速度で供試板を通過するため（金属製銚が供試板に留まらない）、本研究で想定する適切な結合状態が得られない。

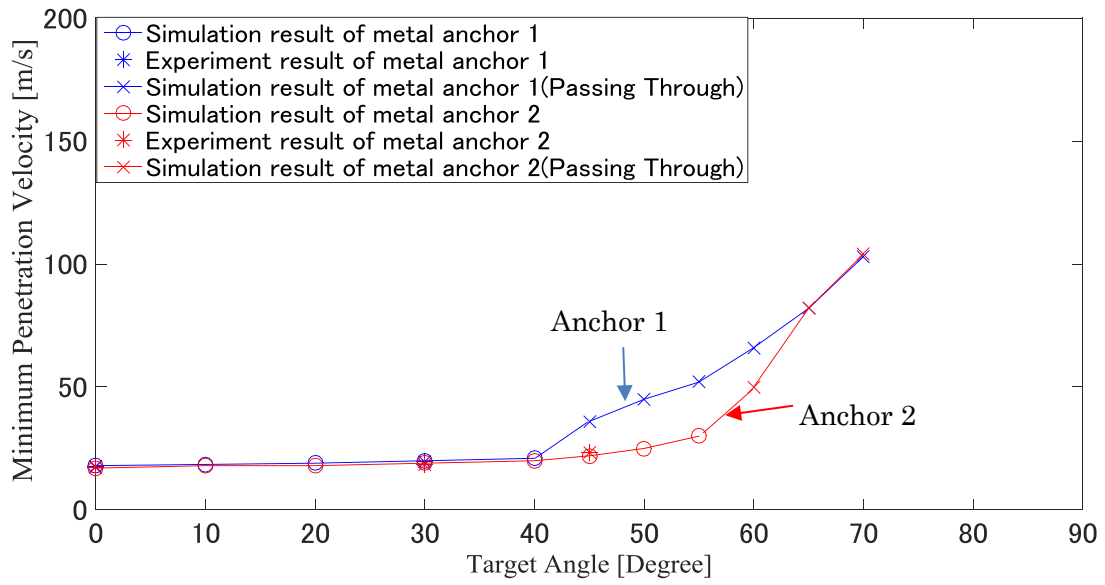


図 4.12 ターゲット角度における数値解析の最小貫入速度

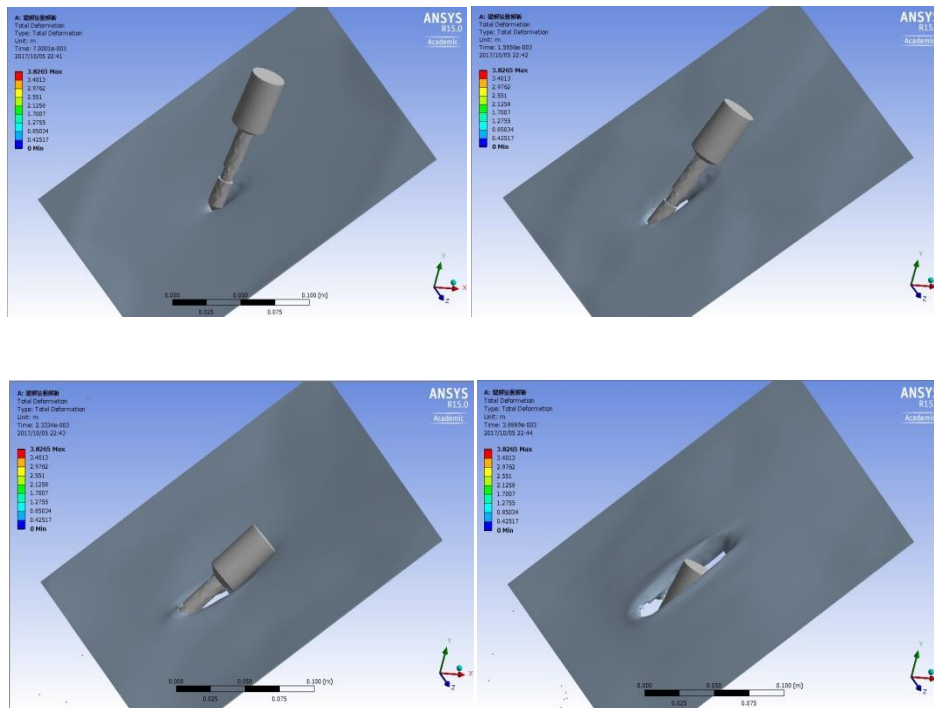


図 4.13 金属製鉋が最小貫入速度でターゲットを貫通するケースの一例

#### 4.5 結論

本解析では、既存の材料モデルを使用し、試験結果と比較することによって、その適用性を評価した。評価の結果、材料加工に関する過去の研究から導出された JC モデルでも 10%程度の最小貫入速度の誤差で、適用可能であることを明らかにした。

さらに金属製銼先端の角度とターゲットの傾き角度の影響をより詳しく検討するために、数値解析を行い、評価を行った。その結果から、試験結果と同様に、ターゲットの傾き角度の余角が金属製銼先端の角度の半分よりも大きい場合、先端角度の大きい金属製銼 1 の最小貫入速度が金属製銼 2 より大きいことが分かった。また、ターゲットの傾き角度の余角が金属製銼先端の角度の半分より小さくなると、金属製銼先端部の側面が供試板表面に衝突し、金属製銼がターゲットに貫入しにくくなり最小貫入速度が上昇するとともに、最小貫入速度において金属製銼は供試板に留まらずアルミニウム合金板を貫通することが分かる。試験と数値解析の結果から、金属製銼先端の角度が小さく、ターゲットの傾き角度の余角が金属製銼先端の角度の半分よりも大きい場合に金属製銼の貫入性が高くなり、適切な結合状態が得られることを明らかにした。

## 第5章 引き抜き強度評価試験

### 5.1 試験目的

金属製銚の撃ち込みによるスペースデブリとの結合方法においては、結合後、デブリ除去システム運用時に金属製銚を引き抜くような力が作用する。そこで、金属製銚の撃ち込みによる結合における固定強度を調べるために、引き抜き強度評価試験を行った。本研究では金属製銚の引き抜き強度をあげるため、複雑な引き抜き防止機構は用いず、以下に示す金属製銚形状の工夫のみによる、引き抜き強度確保を考案し、その有効性を評価する。

- 先端を円錐形とすることで、金属製銚の貫入時にアルミニウム合金板を花卉状に破壊する<sup>21)</sup>。今回の研究では100回以上の撃込み試験を実施したが、常に同じ破壊モードであった。
- 金属銚先端の軸部にくびれを配することで、貫入時に生じた花卉部をくびれに干渉させ、引き抜き強度を向上させる。
- 先端傘部の大きさを軸部より大きくすることで、花卉部とくびれが干渉する確率を増やす。

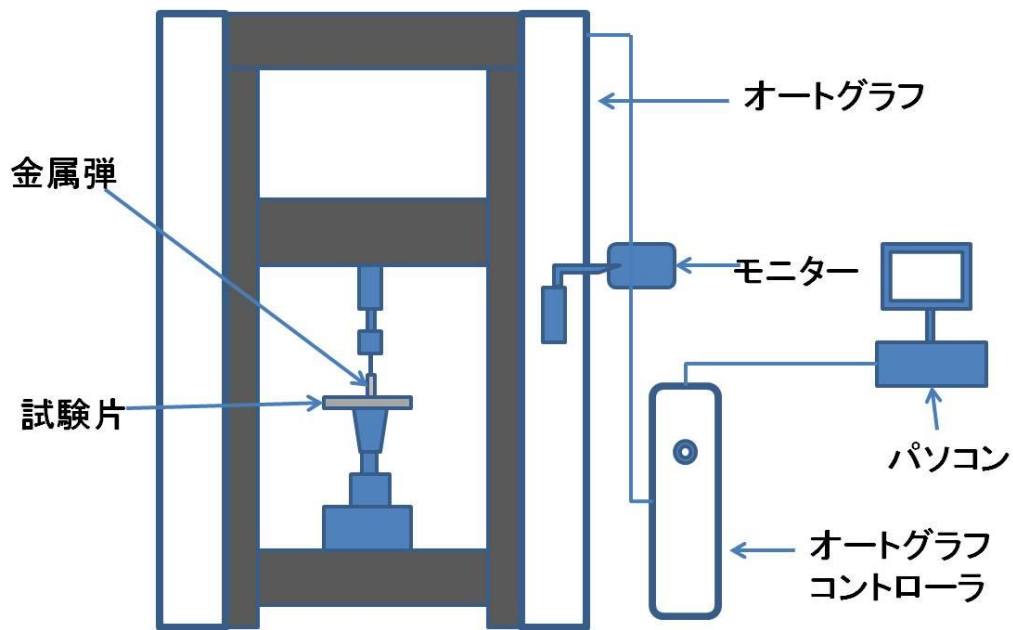
この方法は従来の展開構造を利用する方法よりも簡素で、複雑なメカニズムを必要としない。形状が異なる金属製銚を使用し、引き抜き強度評価試験を行うことにより、金属製銚軸部のくびれの有無と傘部の直径の影響を評価することができる。

### 5.2 試験装置

引き抜き試験では島津オートグラフ (AG-250kN) を使用した。試験装置の外観及び概要を図 5.1 に示す。



(外観)



(概要)

図 5.1 引き抜き強度評価試験装置の外観及び概要図

### 5.3 試験の実施要領

本研究で用いた金属製銚は、金属製銚の先端部のくびれにターゲット構造を引っ掛けることで引き抜き強度を確保するよう形状を工夫したものである。そこで本研究では、引き抜き試験により先端形状の影響を評価する。先端の傘部の直径とくびれ部分の効果を調べるために、傘部の直径の大きい金属製銚 3 とく

びれのない金属製銚 4 を作成し、他の金属製銚の結果と比較する。金属製銚 3, 4 の質量はそれぞれ 209 (g), 206 (g) である。概要を図 5.2, 5.3 に示す。(金属製 1,2 は図 2.1, 2.2 に示す。)

引き抜き試験を行うために、金属製銚をアルミニウム合金 A2024-T3 の供試板に撃ち込み供試体を作成した。なお、金属製銚の撃ち込み速度は、2 章で明らかにした各供試板における適切な撃ちこみ速度とした。引き抜き試験の供試体の概要と金属製銚の撃ち込み位置を図 5.4 に示す。撃ち込み試験後、金属製銚が貫入した状態で引き抜き試験を行い、最大引き抜き強度を求める。図 5.5 に引き抜き試験の構成を示す。

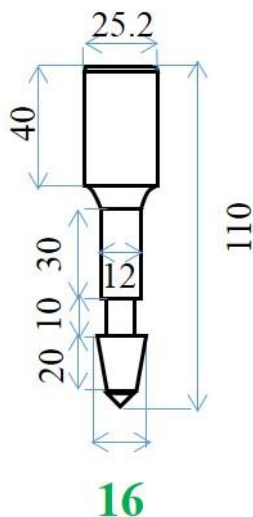


図 5.2 金属製銚 3 の概要図 (単位 : mm)

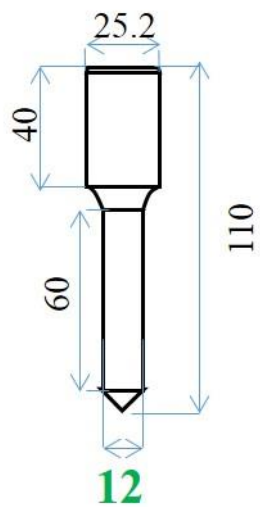


図 5.3 金属製鈎 4 の概要図 (単位 : mm)

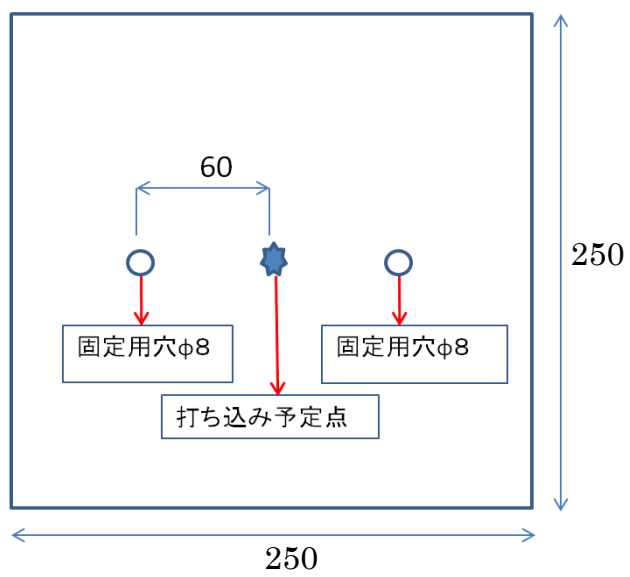


図 5.4 引き抜き試験の供試体の概要図 (単位 : mm)



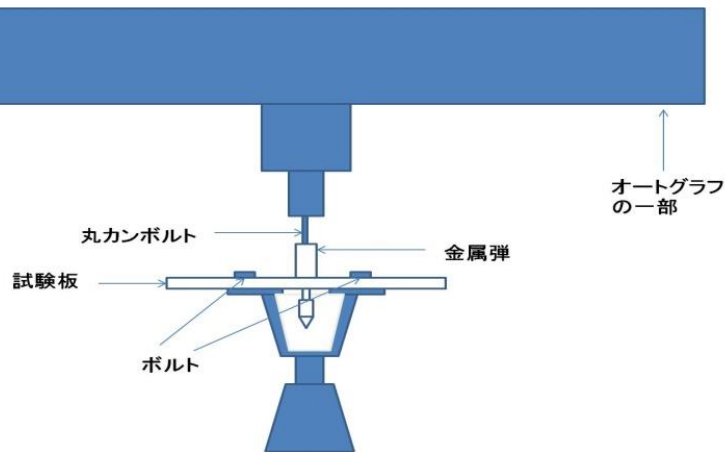


図 5.5 引き抜き試験装置の構成

#### 5.4 試験結果

各供試板における最大引き抜き強度を表 5.1 と図 5.6 に纏めた。また、各ケースの荷重とストロークの関係を図 5.7～5.18 に示す。引き抜き試験中、引き抜き強度が急に下がり、非常に小さくなると(金属製銚軸部のくびれ部分が供試板を通過する時など)、試験機が供試板の破断と判断し自動的に停止する。そのため、試験を再スタートし、実施したケースもある。金属製銚と引き抜き試験時の供試板の様子を図 5.19, 5.20 に示す。

金属製銚 1 を用いた場合、1 回目の引き抜き試験では金属製銚が引っ掛からず、引き抜き強度は低かった、しかし、2 回目と 3 回目では、傘部が撃ち込みによって発生したアルミニウムの花弁部に引っ掛かり、引き抜き強度はかなり大きくなった。金属製銚の傘部は引き抜き中供試板の花弁部に引っ掛かった場合と引っ掛からない場合の概要を図 5.21 に示す。

金属製銚 2,3 を用いた場合、すべての引き抜き試験で、金属製銚の傘部が発生したアルミニウムの花弁部に引っ掛かり、大きな引き抜き強度が得られた。くびれの無い金属製銚 4 の場合、他のケースよりも引き抜き強度が非常に小さかった。

このように、引き抜き中に金属製銚が供試板に引っ掛かった場合と引っ掛からず平滑に引き抜かれる場合があり、それによって引き抜き強度は大きく異なる。例えば図 5.19 と図 5.20 に同じ金属製銚 1 の引き抜き試験結果(ケース 1, 2)

を示すが、図 5.19 は金属製銚が供試板に引っ掛からなかったケースであり、図 5.20 は、金属製銚が引っ掛かり、供試板を破壊する形で引き抜かれたケースである。この破壊現象の概要を図 5.22 に示す。金属製銚の傘部が供試板に引っ掛かることで引き抜き強度が大きくなり、良好な結合状態が達成できると考えられる。

先端角度が同じ金属製銚 1 と金属製銚 3 を比較すると、傘部の大きい金属製銚 3 では全部のケースにおいて金属製銚の傘部がパネルに引っ掛かり、大きな引き抜き強度が得られた。これは、金属製銚 3 の傘部が他の金属製銚と比べ直径が大きいためである。また、金属製銚 4 の引き抜き強度を他の金属製銚の引き抜き強度と比べると、総じて小さいことが分かる。これはくびれ部がないため、花卉部が引掛りなく抜けてしまったことによる。これらの結果から、デブリとの結合に用いる金属製銚としては、先端の軸部の一部がくびれた形状が適切と考えられる。

なお EDT などのテザーを用いたデブリの除去の場合、テザーの伸展時に十数 N の張力がテザーに負荷されることが報告されており<sup>2)</sup>、本研究で検討した金属製銚の撃ち込みによる固定法は、テザーを用いたデブリ除去における結合方法として十分な引き抜き強度を有していることが確認できた。

表 5.1 アルミニウム合金供試板の最大引き抜き強度

ケース	金属製鉛	撃ち込み速度 (m/s)	引き抜き強度(N)
1	1	19.8	255.7
2	1	20.3	2065.3
3	1	19.6	2071.9
4	2	18.5	1957.4
5	2	19.8	1655.6
6	2	20.7	1875.4
7	3	19.3	1971.2
8	3	20.5	1341.7
9	3	19.3	2107.6
10	4	19.3	281.8
11	4	20.4	277.2
12	4	19.8	261.1

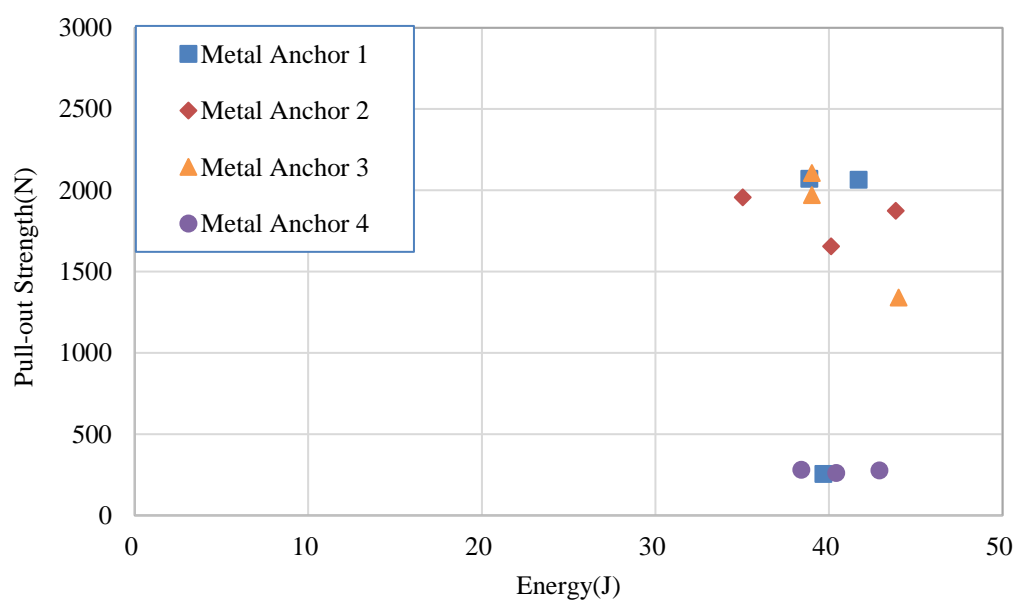


図 5.6 引き抜き試験結果のまとめ

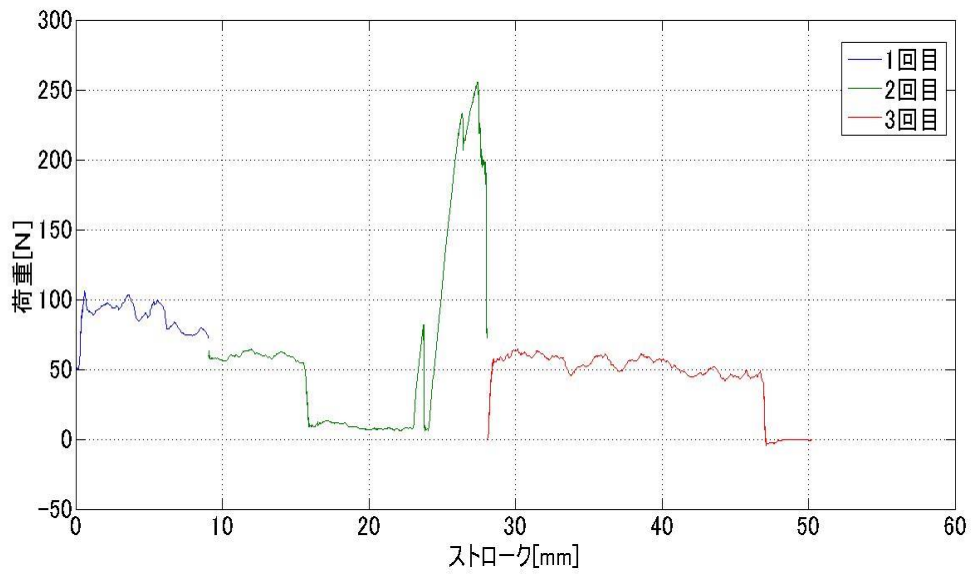


図 5.7 荷重とストロークの関係  
(アルミニウム合金供試板-ケース 1, 金属製銚 1)

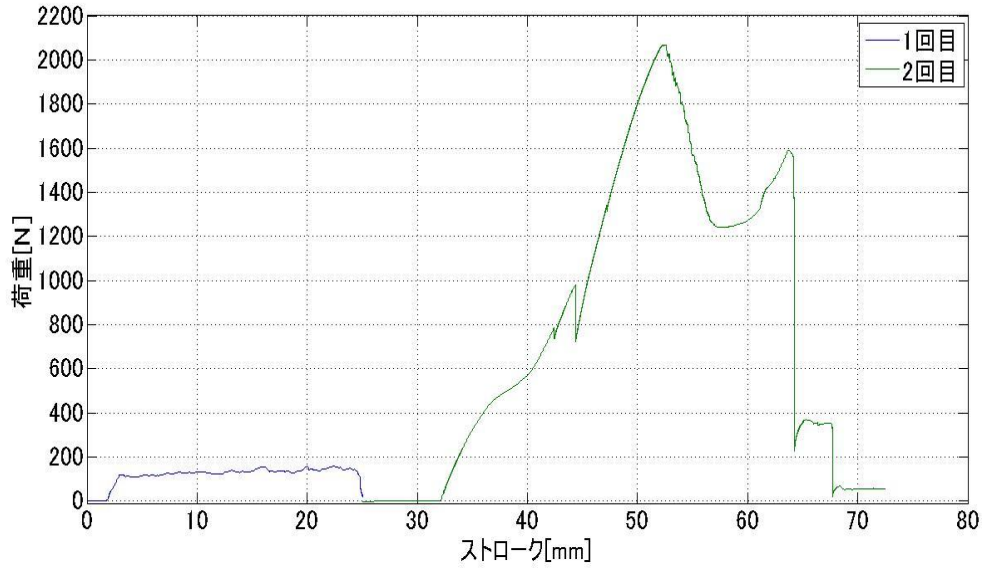


図 5.8 荷重とストロークの関係  
(アルミニウム合金供試板-ケース 2, 金属製銚 1)

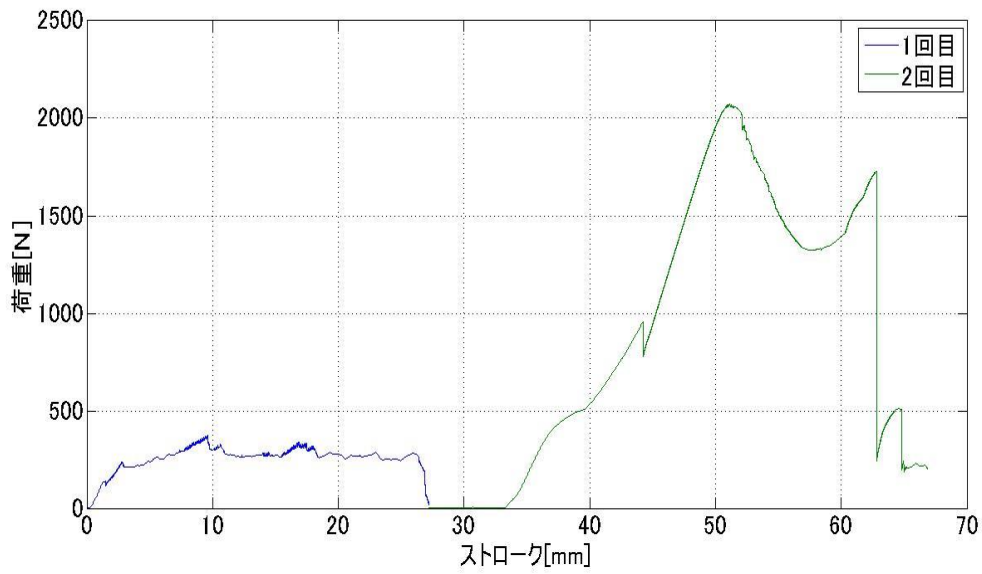


図 5.9 荷重とストロークの関係  
(アルミニウム合金供試板-ケース 3, 金属製銼 1)

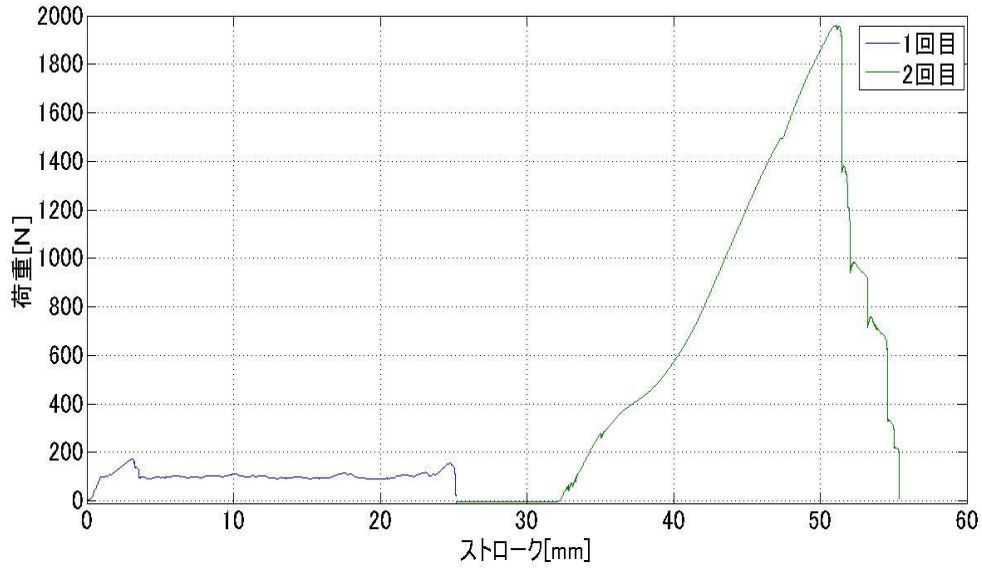


図 5.10 荷重とストロークの関係  
(アルミニウム合金供試板-ケース 4, 金属製銼 2)

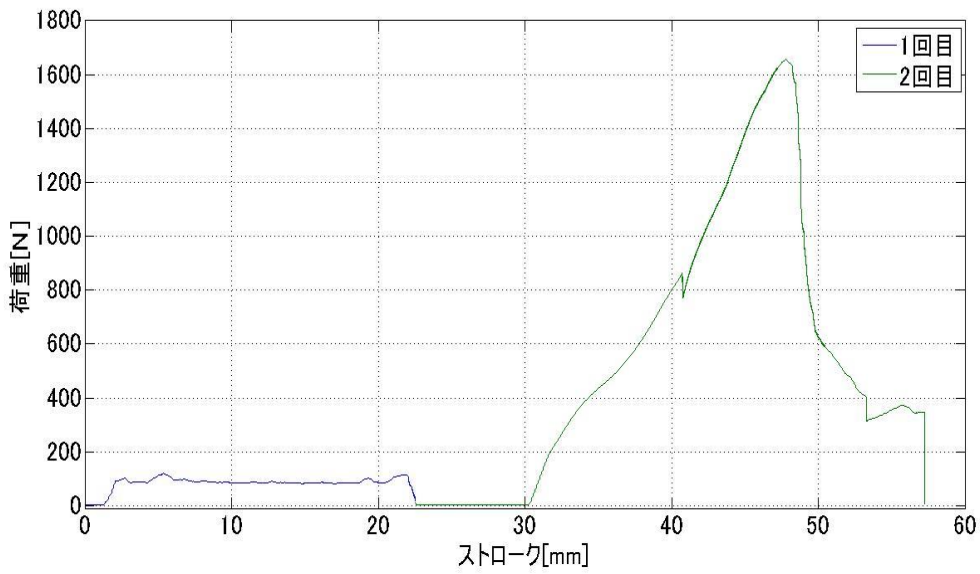


図 5.11 荷重とストロークの関係  
(アルミニウム合金供試板-ケース 5, 金属製銼 2)

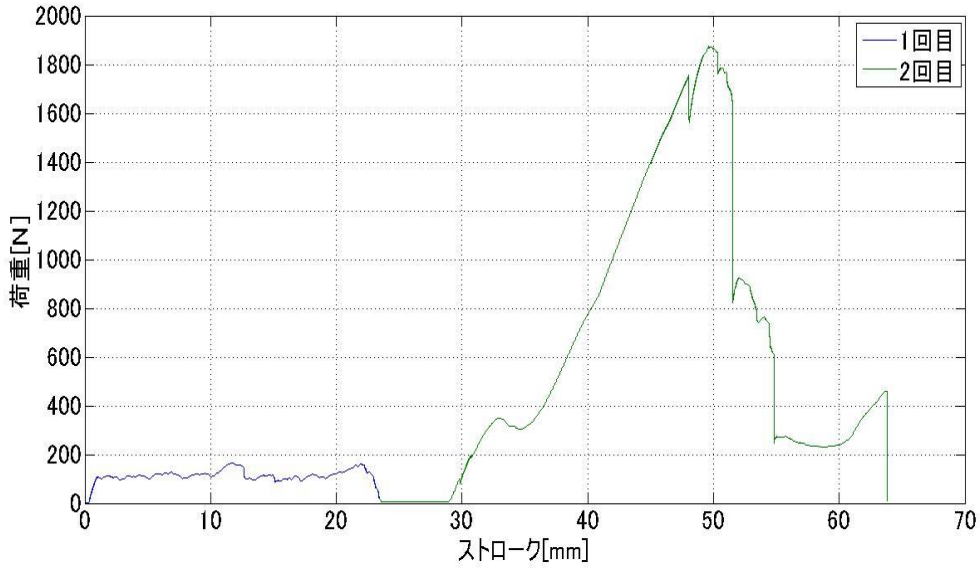


図 5.12 荷重とストロークの関係  
(アルミニウム合金供試板-ケース 6, 金属製銼 2)

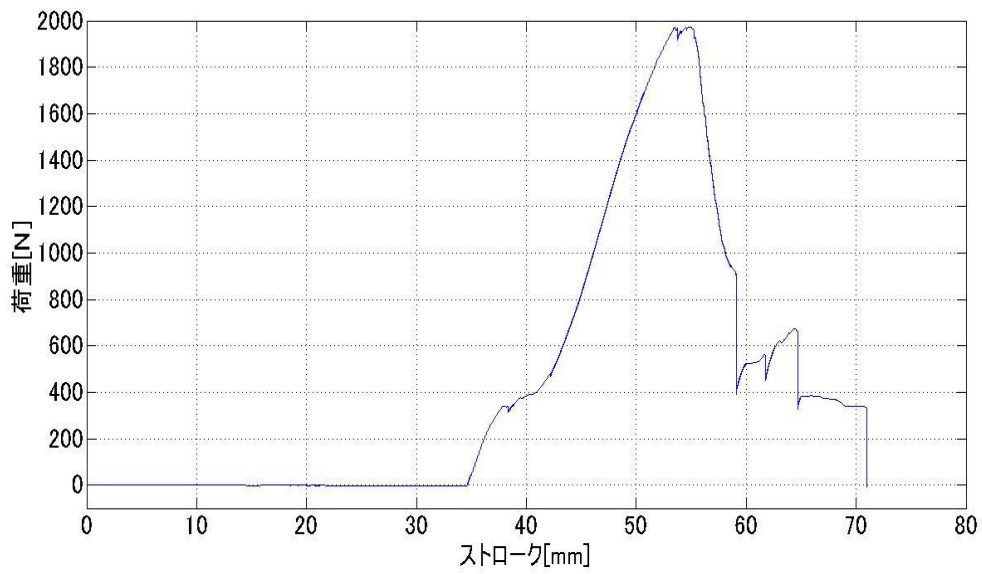


図 5.13 荷重とストロークの関係  
(アルミニウム合金供試板-ケース 7, 金属製銚 3)

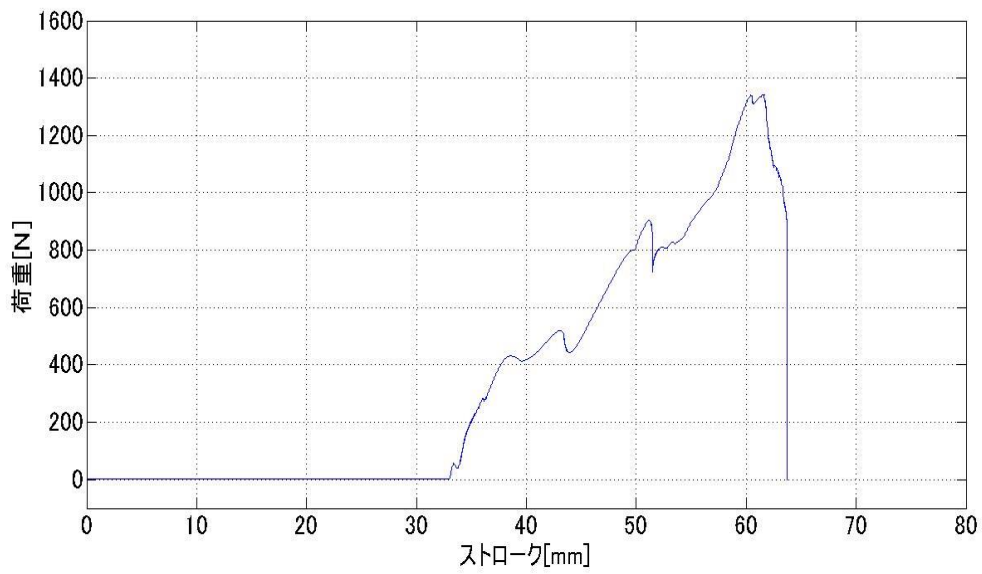


図 5.14 荷重とストロークの関係  
(アルミニウム合金供試板-ケース 8, 金属製銚 3)

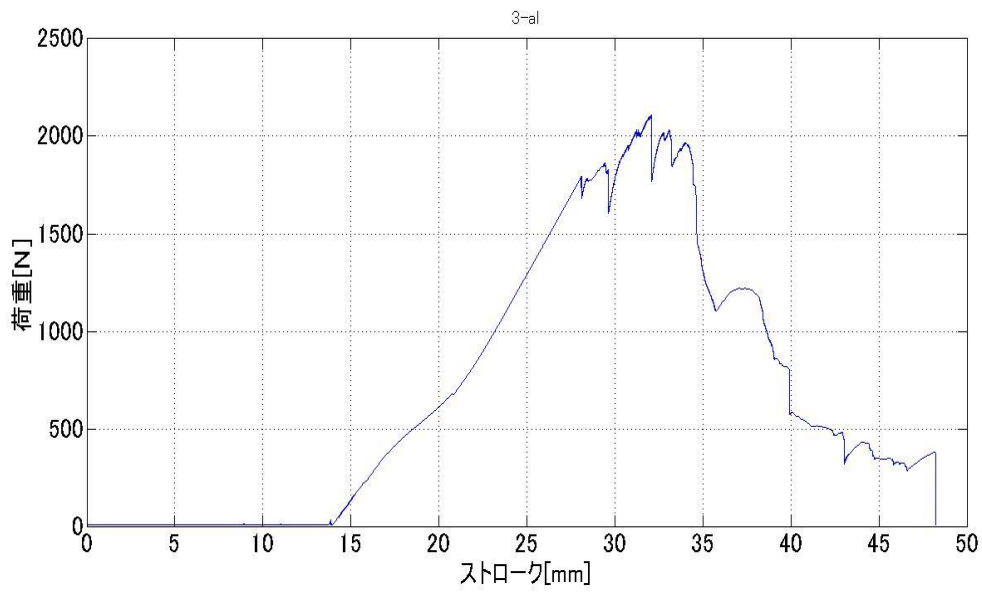


図 5.15 荷重とストロークの関係  
(アルミニウム合金供試板-ケース 9, 金属製銚 3)

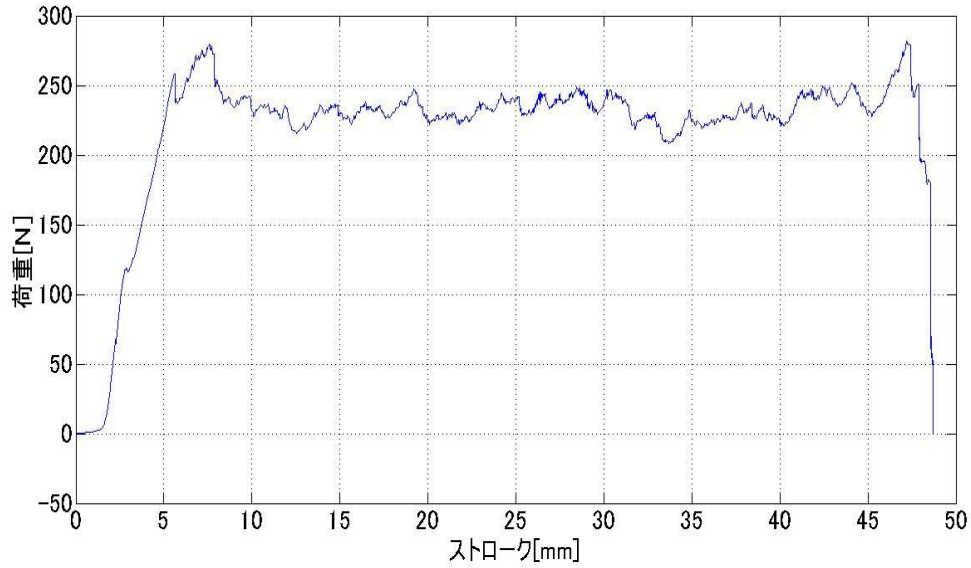


図 5.16 荷重とストロークの関係  
(アルミニウム合金供試板-ケース 10, 金属製銚 4)



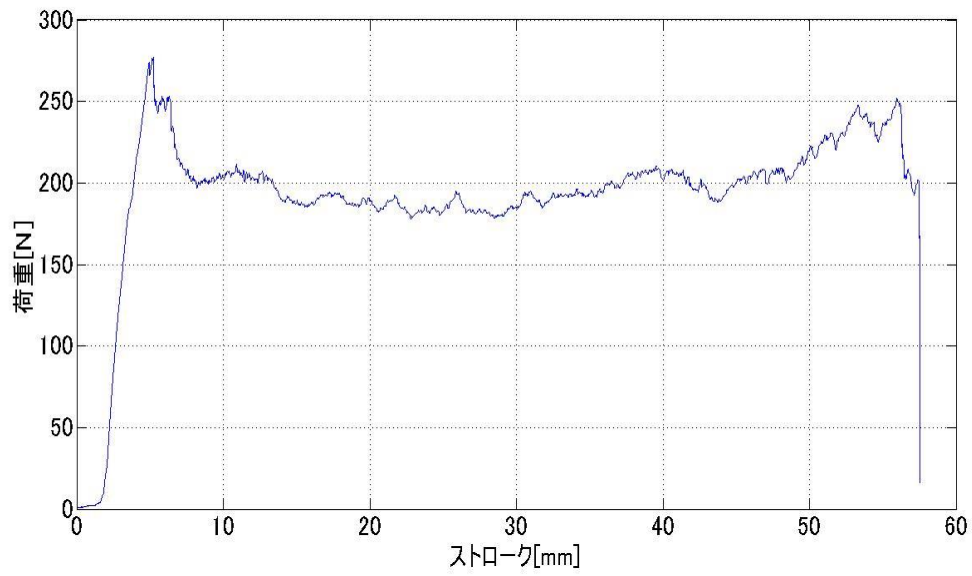


図 5.17 荷重とストロークの関係  
 (アルミニウム合金供試板-ケース 11, 金属製銚 4)

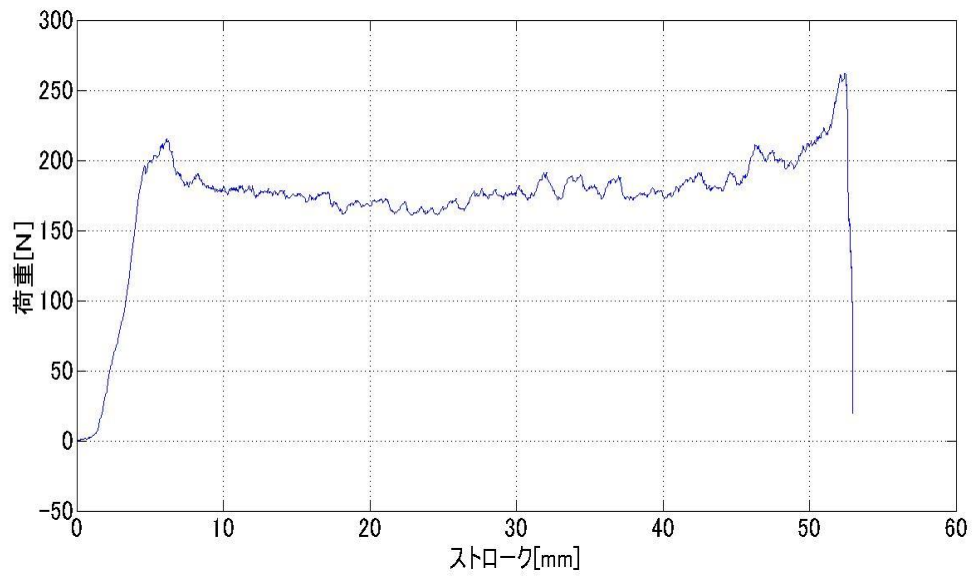


図 5.18 荷重とストロークの関係  
 (アルミニウム合金供試板-ケース 12, 金属製銚 4)

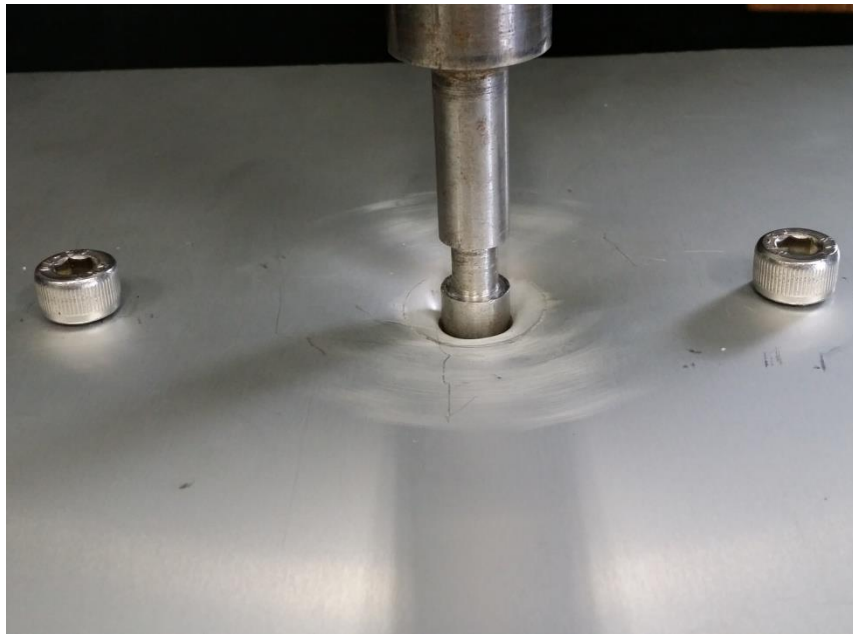


図 5.19 引き抜き試験時の供試板の様子：  
金属製銚傘部が引掛からない場合の様子(ケース 1, 金属製銚 1)

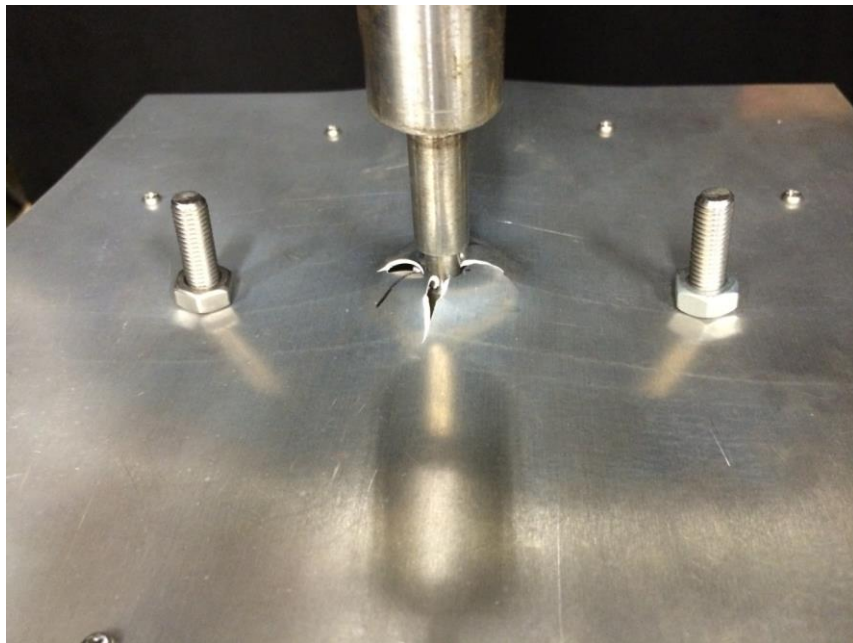
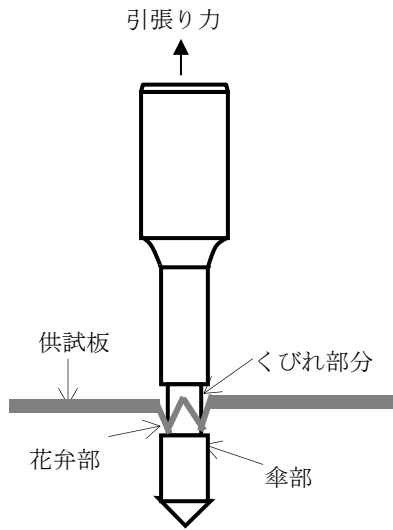
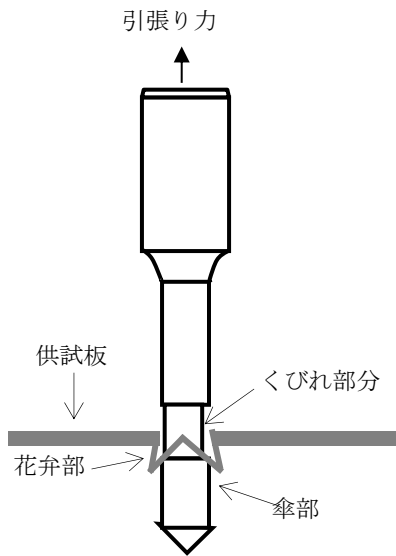


図 5.20 引き抜き試験時の供試板の様子：  
金属製銚傘部が引掛かった場合の様子(ケース 2, 金属製銚 1)



金属製鉈の傘部が供試板の花弁部に引っ掛かった場合



金属製鉈の傘部が供試板の花弁部に引っ掛からない場合

図 5.21 金属製鉈の傘部が供試板の花弁部に引っ掛かった場合  
と引っ掛からない場合の概要

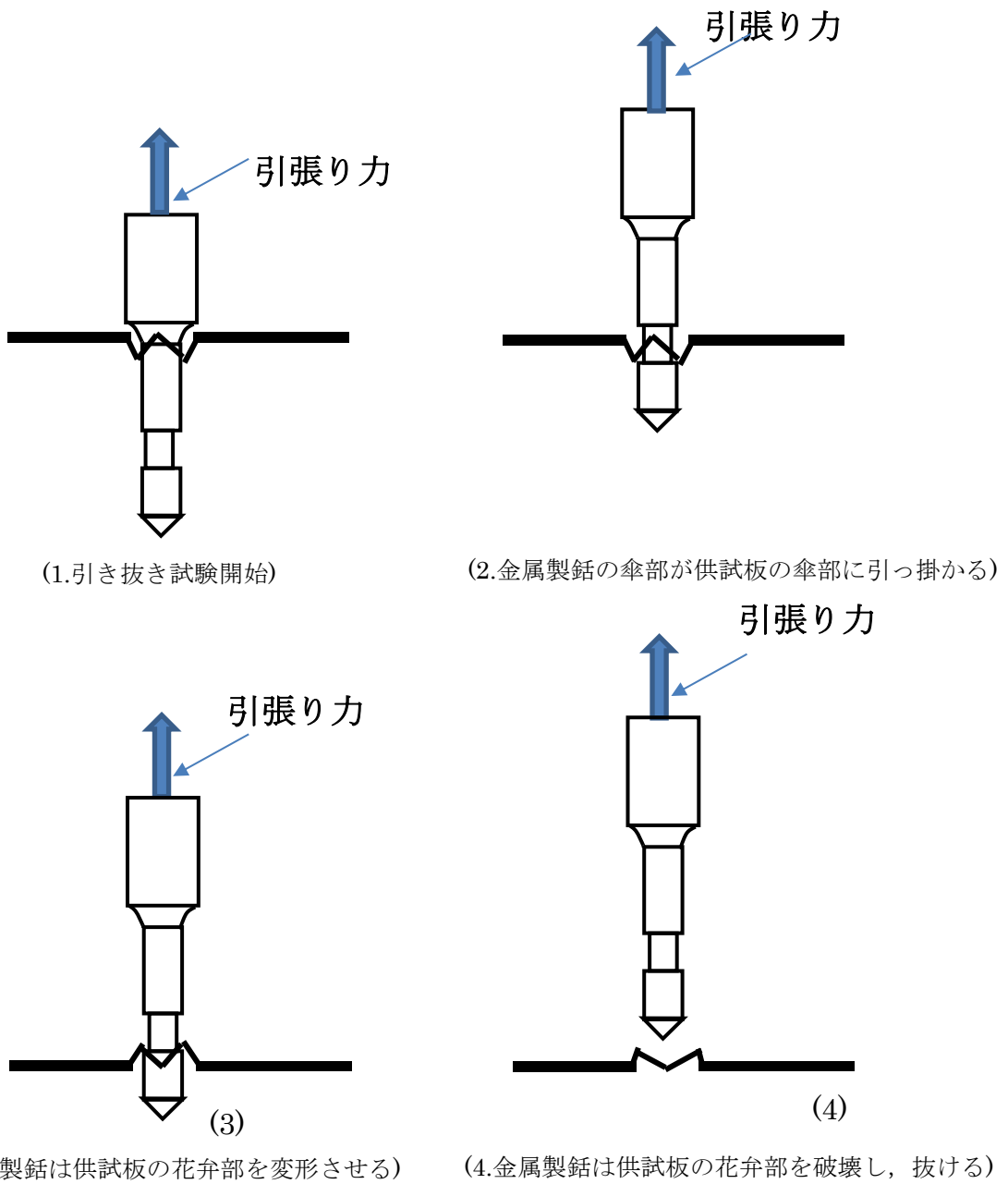


図 5.22 金属製鉗が供試板の花弁部に引掛かった場合の引き抜きの様子

## 第6章 結論および今後の課題

### 6.1 結論

本研究では、金属製銚撃ち込み方法についての各種試験および数値解析を実施し、それらの課題について検討を行い、従来の研究における未解決な問題を明確にすることにより、金属製銚撃ち込みによるデブリ構造との結合方法の有効性を示した他、結合に適した金属銚形状や撃ち込み条件に関する指針を得た。さらに、実用化に向けた詳細な検討に利用できる数値解析モデルを構築した。

まず金属製銚形状に関して、適切な貫入状態の実現および簡素なシステムによる結合強度向上を目指し、以下の方針を提案した。

- ・ターゲットを花卉状に裂くよう、先端形状を円錐形状とした。
- ・引抜時に花卉部を引掛けるよう、金属弾軸部にくびれ部を設けた。また、先端傘部の大きさを軸部より大きくすることで、花卉部とくびれが干渉する確率を増やす。
- ・貫通を避けるよう、金属製銚の後部を太くした。

次に、撃ち込み試験では固定条件の異なる供試体に対する試験を行った。まず、固定された供試体への撃ち込み試験を実施し、撃ち込みに対する運動エネルギーと運動量の影響を評価した結果、金属製銚の貫入状態は運動エネルギーの影響が大きいことが分かった。金属製銚の先端角度とターゲット角度に関しては、概ね金属製銚先端角度の半分以下のターゲット角度の余角では、金属製銚の撃ち込み可能性が高いこと、ターゲットの角度の上昇とともに必要な運動エネルギーが上昇することを明らかにした。

次に軌道上の小さいデブリ（慣性が小さいデブリ）への撃ち込み時の挙動を確認するため、自由落下中の供試体への撃ち込み試験装置を開発し、試験を行った。供試体を固定した場合に比べ、自由落下中の供試体への撃ち込みでは最小貫入速度が増加することが確認され、また、ターゲットの重心から外れた位置に撃ち込んだ場合、最小貫入速度がさらに上昇した。これは金属製銚の運動エネルギーが貫入に加えて、供試体の回転運動に使われるためであると考えられる。この仮説を確認するため、運動量およびエネルギー保存則を基に、固定状態での最小貫入速度と自由落下状態での最小貫入速度を結びつける関係式を導出し、試験結果か

らその妥当性を確認した。

さらに多様なスペースデブリ（サイズと姿勢）に対応できるため、上記の試験に対応した数値モデルを構築、解析を実施した。金属材料の特性モデルとして Johnson-Cook モデルを用いた場合に試験結果との誤差が小さいことを明らかにした。評価の結果、材料加工の研究から導出された JC モデルでも 10%程度の誤差で、最小貫入速度の評価に適用できることが分かった。この数値解析モデルは極端に異なる二つの境界条件（完全固定と完全フリー）の撃ち込み現象を統一的に再現できるため、様々なスペースデブリへの撃ち込みについての検討が可能と考えられる。このモデルを用いた数値解析により金属製銚の先端角度の影響と供試体の傾き角度の影響を先行研究より詳細に評価した。数値解析の結果から、先端角度の大きい金属製銚 1 の最小貫入速度が金属製銚 2 より大きいことが分かった。また、ターゲットの傾き角度の余角が金属製銚先端の角度の半分より小さくなると、金属製銚先端部の側面が供試板表面に衝突し、金属製銚がターゲットに貫入しにくくなり最小貫入速度が上昇するとともに、最小貫入速度において金属製銚は供試板に留まらずアルミニウム合金板を貫通することが分かる。試験と数値解析の結果から、金属製銚先端の角度が小さく、ターゲットの傾き角度の余角が金属製銚先端の角度の半分よりも大きい場合に金属製銚の貫入性が高くなり、適切な結合状態が得られることを明らかにした。

引き抜き強度試験を実施し、撃ち込んだ金属製銚の引き抜き強度を向上させる金属製銚形状に関する方針に関して、その有効性を示した。本研究の提案では、従来の研究と異なり、複雑な引き抜け防止装置を用いず、金属製銚の形状工夫のみで、引き抜き強度を向上するため、誤動作の問題を避けることができる。傘部の直径が大きく、くびれ部分のある形状では引き抜き中、くびれ部が供試板の貫入時に生じた花卉部に引っ掛かり、2000N 程度の大きな結合強度が得られた。このことより本研究で検討した金属製銚の撃ち込みによる固定法は、デブリ除去における固定方法として十分な引き抜き強度を有していることが確認できた。

なお、実ミッションでは様々な対象に適した形状の金属製銚が必要となるが、今回提案した形状コンセプトを基礎として、構築した数値解析モデルを用いた形状最適化を実施することで実ミッションにおいて利用できる金属製銚の開発

が期待できる。また、実際のミッションにおいて、ターゲットの材料が本研究で用いた材料と異なっても、本研究で検討を行った方法と同じ流れで、有効な数値解析モデルを構築することができ、銚システムの開発に利用できると考えられる。

## 6.2 今後の課題

本研究では撃込みに関する数値解析モデルの構築を行い必要な撃込み速度に関しては数値解析による予測が可能となっているが、引き抜き強度に関しては試験を行う必要がある。引抜強度向上に向けた銚形状の最適化などのためには、引抜に関しても数値解析モデルの構築が望まれる。

次に、スペースデブリを構成する構造の材料は多様であり、主だった材料に関しては今回の研究と同様の撃込み試験を実施し、データの蓄積が必要と考えられる。

さらに本研究ではスペースデブリ捕獲に向けた基礎的検討であるが、スペースデブリ除去は宇宙開発における喫緊の課題であり、実際のスペースデブリの除去に向けた銚の設計や、数値解析の開始が望まれる。実際に本銚システムを H-IIA ロケット上段との結合に利用する検討が、JAXA-防衛大で開始されており、より複雑な形状に対する数値解析や試験の実施が必要となる。

## 付録 A 他の材料への撃ち込みの試験

本研究において、アルミニウム合金の供試板以外、アルミハニカムサンドイッチと CFRP の供試板への撃ち込み試験も行った。参考として付録に追加する。これらの供試板のサイズを表 A.1 に示す。

表 A.1 各供試板の部材及びサイズ

部材	サイズ(mm)
アルミハニカムサンドイッチ	250 x 250 x15
CFRP 板	250 x 250 x1

撃ち込み試験の設置と要領はアルミニウム合金板の試験と同様で、使用する金属製銚は金属製銚 1,2,3 である。撃ち込み試験結果を図 A.1~6 に、撃ち込み試験様子を図 A.7, A.8 に示す。試験結果から、アルミハニカムサンドイッチと CFRP 供試板への撃ち込みに関しても、金属製銚が適切に貫入する速度区間が存在し、撃ち込みエネルギーにより、3つの貫入状態が確認できた。最小貫入速度に関して、CFRP 板、アルミニウム合金板、アルミハニカムサンドイッチの順で上昇することが分かった。

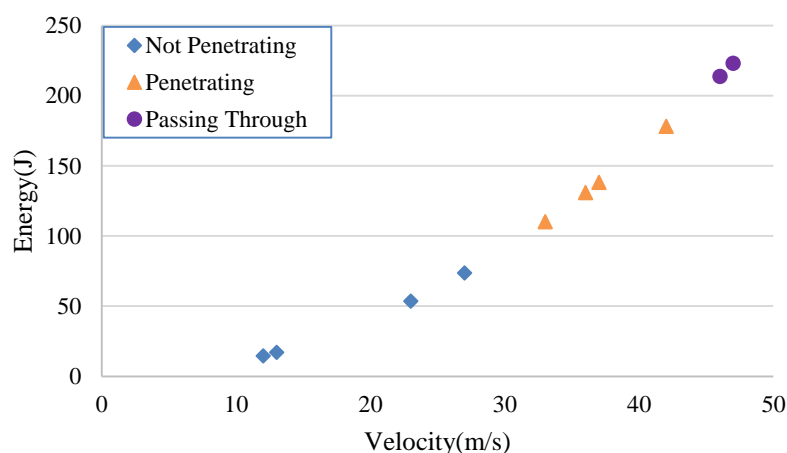


図 A.1 アルミハニカムサンドイッチ供試板—金属弾 1 の撃ち込み速度と結合状態



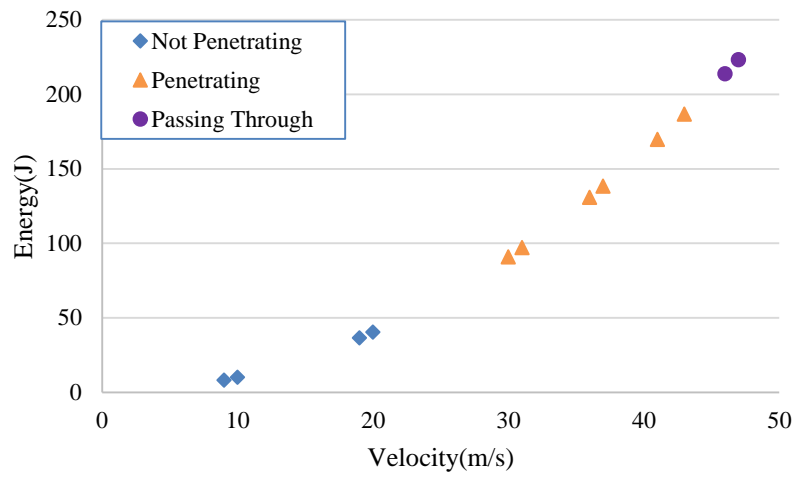


図 A.2 アルミハニカムサンドイッチ供試板—金属弾 2 の  
撃ち込み速度と結合状態

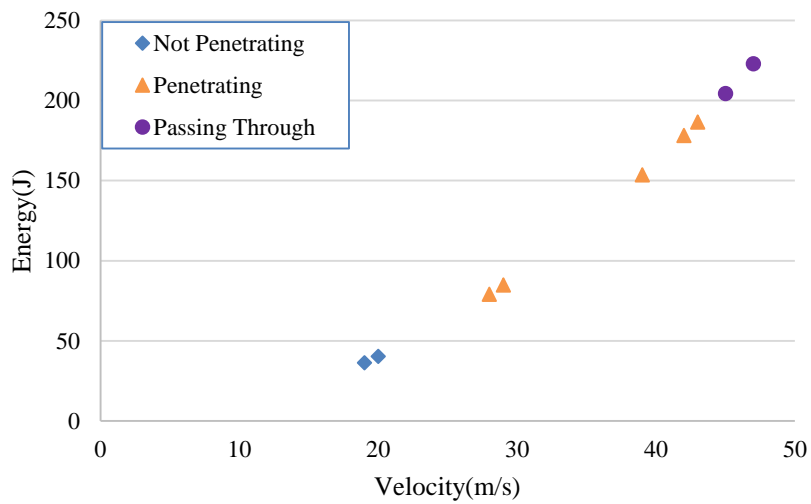


図 A.3 アルミハニカムサンドイッチ供試板—金属弾 3 の  
撃ち込み速度と結合状態

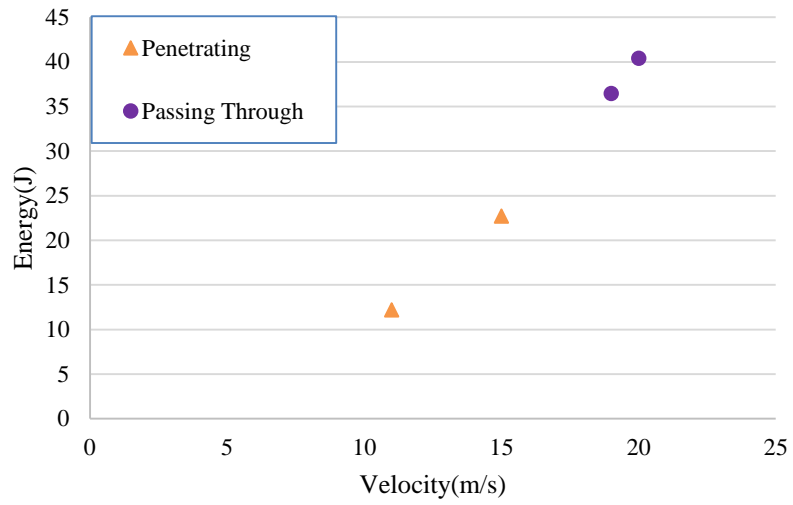


図 A.4 CFRP 供試板—金属弾 1 の撃ち込み速度と結合状態

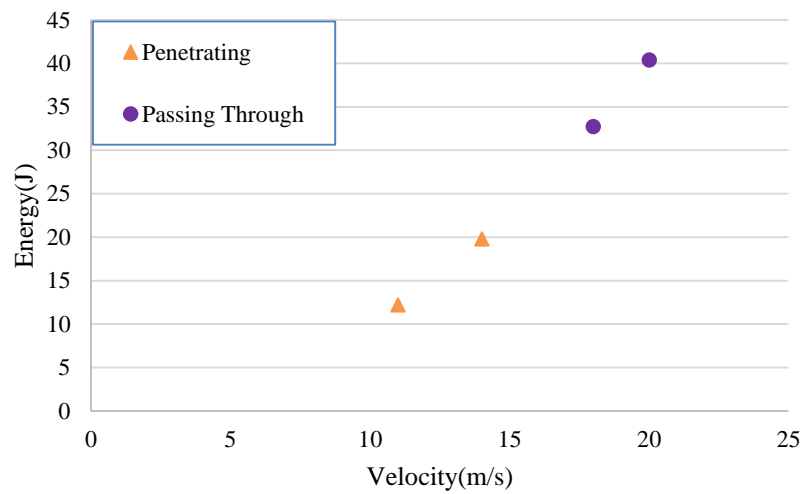


図 A.5 CFRP 供試板—金属弾 2 の撃ち込み速度と結合状態

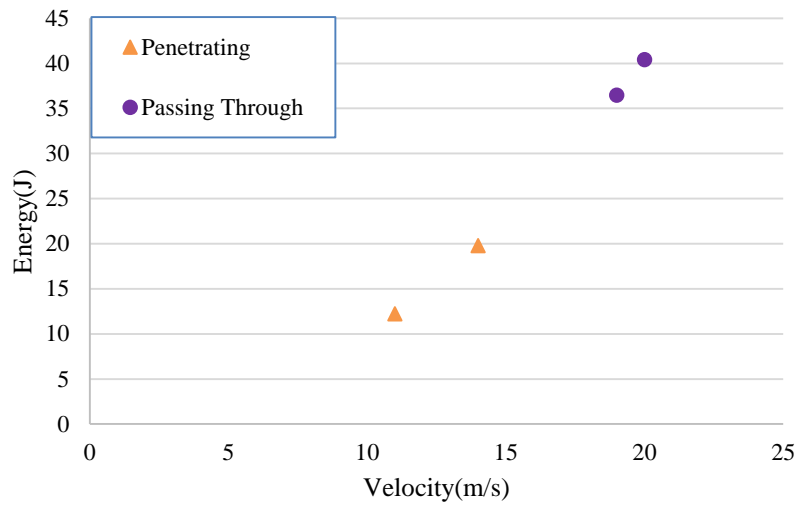


図 A.6 CFRP 供試板—金属弾 3 の撃ち込み速度と結合状態



図 A.7 アルミハニカムサンドイッチ供試板への撃ち込み試験様子

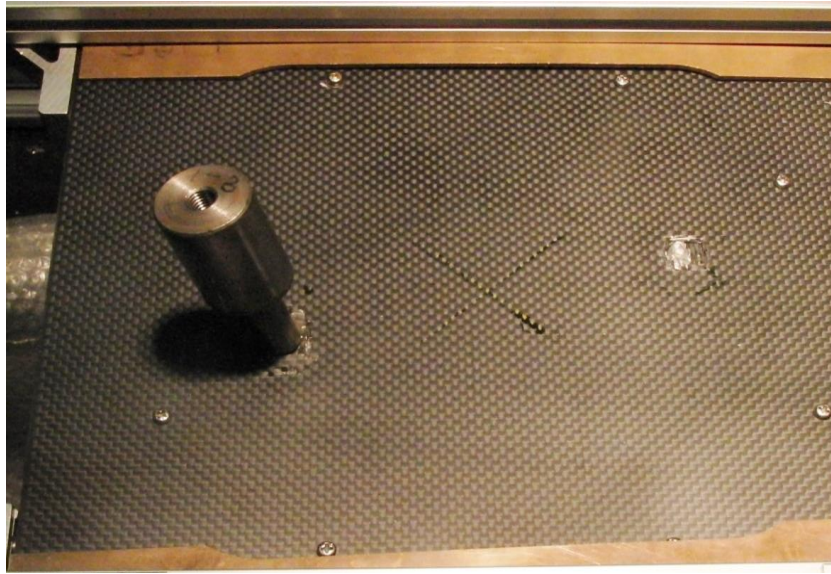


図 A.8 CFRP 供試板への撃ち込み試験様子

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教官田中宏明教授には、終始懇切なるご指導をいただきました。心からの謝意を表します。

実験装置等の作成には、本学科の工作室小山弘幸氏、菅野茂延氏、熊本大学の波多英寛助教からご指導、ご援助いただき、深く感謝致します。

試験の実施にあたっては、指導教官田中宏明教授をはじめ、熊本大学の波多英寛助教、第 59 期本科伊藤駿学生、第 61 期本科奥勇人学生からの協力をいただき、誠にありがとうございました。

## 参考文献

- (1) M. Shan, J. Guo, E.K.A. Gill, Review and comparison of active space debris capturing and removal methods, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol.80, pp.18-32, 2016.
- (2) NASA, *Orbital debris quarterly news*, Vol.20, Issue.1&2, 2016.
- (3) J.-C Liou, N. L. Johnson, Risks in space from orbiting debris, *Science*, Vol.311, Issue.5759, pp.340–341, 2006.
- (4) B. Bastida, H. Krag, Analyzing the criteria for a stable environment, *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference*, 2011.
- (5) Y. Ishige, S. Kawamoto, S. Kibe, Study on electrodynamic tether system for space debris removal, *Acta Astronaut*, Vol.55, pp.917–929, 2004.
- (6) 壹岐賢太郎,河本聡美,森野美樹, 離散質点モデルを用いた導電性テザー伸展シミュレーションによる伸展ダイナミクスの検討(ダイナミクス), *スペース・エンジニアリング・コンファレンス*, D3, 2012.
- (7) S.Kawamoto, T.Makida, F.Sasaki, Y.Okawa, S.Nishida, Precise numerical simulations of electrodynamic tether for an active debris removal system, *Acta Astronautica*, Vol.59, pp.139-148, 2006.
- (8) S. Hobbs, J. Kingston, P. Roberts, C. Juanes, R. Sewell, B. Snapir, F. Robinson, J.V. Llop, J. Hobbs, Deorbit sail design for Techdemosat-1, *6th European Conference on Space Debris*, 2013.
- (9) K. Wormnes, R. Le Letty, L. Summerer, H. Krag, R. Schonborg, O. Dubois-Matra, E. Luraschi, J. Delaval, A. Cropp, ESA technologies for space debris remediation, *6th European Conference on Space Debris*, 2013.
- (10) [http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2016/12/e.Deorbit\\_will\\_be\\_the\\_first-ever\\_active\\_debris\\_removal\\_mission4](http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2016/12/e.Deorbit_will_be_the_first-ever_active_debris_removal_mission4) (平成 29 年 12 月 19 日閲覧) .
- (11) S. Nishida, S. Kawamoto, Strategy for capturing of a tumbling space debris, *Acta Astronautica*, Vol.68, Issues.1-2, pp.113-120, 2011.
- (12) R. Lampariello, On grasping tumbling debris object with free-flying robot, *IFAC Proceeding Volumes*, Vol.46, Issue 19, pp. 161–166, 2013.

- (13) J.J. Gonzalez-Vallajo, W. Fehse, A. Tobias, A multipurpose model of hermes-columbus docking mechanism, 26th Aero Mechanisms Symposium, pp. 297–313, 1992.
- (14) M. Hardt, C. Mas, A. Ayuso, D. Cocho, L. Mollinedo, O. Gracia, P. Urmston, Validation of space vehicle docking with the international berthing & docking mechanism and a Kuka robot, 14th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 2011.
- (15) ESA, e.Deorbit, CDF study report, 2012.
- (16) R. Benvenuto, Implementation of a net device test bed for space debris active removal feasibility demonstration, M.S. thesis, 2012.
- (17) [http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/09/Netting\\_a\\_derelict\\_satellite](http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/09/Netting_a_derelict_satellite) (平成 29 年 12 月 19 日閲覧)
- (18) J. Reed, J. Busuets, C. White, Grappling system for capturing heavy space debris, 2nd European Workshop on Active Debris Removal, 2012.
- (19) 泉山卓, 笹川千春, 河本聡美, 大川恭志, 小型銚方式によるデブリ捕獲システムの概念検討, 第 7 回「スペースデブリワークショップ」, E3, 2016.
- (20) R. Dudziak, S. Tuttle, S. Barraclough, Harpoon technology development for the active removal of space debris, *Advances in Space Research*, Vol.56, Issue.3, pp. 509–527, 2015
- (21) 又木隆彦, 赤星保浩, 高良隆男, 河越三郎, 景山恵, 北澤幸人, 島村和夫, 泉山卓, 橋本こずえ, 河本聡美, 青山順一, スペースデブリ捕獲銚の質量および先端形状変化における貫入特性評価, 平成 27 年度衝撃波シンポジウム, 2015.
- (22) グエン バ タイン ロン, 田中宏明, 波多英寛, デブリ捕獲に向けた衛星構体への金属弾撃ち込みに関する基礎研究, 日本機械学会論文集, 83 巻 845 号, 2017.
- (23) 細川剛史, 熊倉郁夫, 峯岸正勝, 岩崎和夫, 旅客機客席構造の耐衝撃性向上に関する解析的研究, 計算工学講演会論文集 6(2), pp.467-470, 2001.
- (24) G.R. Johnson, W.H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.21, No.1, pp.31-48, 1985.
- (25) M. Asad, F. Girardin, T. Mabrouki, J.-F. Rigal, Dry cutting study of an aluminium

alloy (A2024-T351): a numerical and experimental approach, *International Journal of Material Forming*, Vol.1, Supplement 1, pp.499–502, 2008.

(26) D. Lesuer, Experimental investigation of material models for Ti-6Al-4V and 2024-T3, FAA Report DOT/FAA/AR-00/25, 2000.



## 研究業績

### 学術論文

- (1) グエン バ タイン ロン, 田中宏明, 波多英寛, “デブリ捕獲に向けた衛星構体への金属弾撃ち込みに関する基礎研究”, 日本機械学会論文集, 83 巻 845 号, 2017.
- (2) Nguyen Ba Thanh Long, Hiroaki Tanaka and Hidehiro Hata, “Evaluation of the effect of the point angle and angle of incidence of a metal anchor on its docking state in a satellite structure for space debris mitigation”, JSME-D-17-00087, Mechanical Engineering Journal, 2017(採択済み, 公開予定).
- (3) Nguyen Ba Thanh Long, Hiroaki Tanaka and Hidehiro Hata, “Experimental study on lodging a metal anchor into free-falling targets for space debris mitigation”, J TJSAS-D-17-00062, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2017(投稿中).

### 学会等発表記録

### 国際会議

- (1) Nguyen Ba Thanh Long, Hiroaki Tanaka and Hidehiro Hata, “Experimental evaluation of impact velocity and tensile load of lodging an anchor on a satellite structure for space debris mitigation system”, The 30<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science 2015, 2015-r-31, Kobe, Japan, July 2015.
- (2) Nguyen Ba Thanh Long, Hiroaki Tanaka and Hidehiro Hata, “Evaluation of Impact Characteristic of Lodging an Anchor On a Satellite Structure for Space Debris Mitigation System”, The 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, E6-2, Toyama, Japan, October 2016.
- (3) Nguyen Ba Thanh Long, Hiroaki Tanaka and Hidehiro Hata, “Evaluation on lodging an anchor to non-fixed target for space debris mitigation”, International Astronautical Congress 2017, IAC-17.A6.IP.25x38620, Adelaide, Australia, September 2017.

## 学会発表

- (1) グェン バ タイン ロン, 田中宏明, “衛星構体への金属弾撃ち込みにおける衝撃特性評価”, 第 22 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, P03, 東京, 2013 年 12 月.
- (2) グェン バ タイン ロン, 田中宏明, 波多英寛 “衛星構体への金属弾撃ち込みにおける撃ち込み速度及び固定強度評価”, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 1G10(JSASS-2014-4139), 長崎, 2014 年 11 月.
- (3) グェン バ タイン ロン, 田中宏明, 波多英寛, “デブリ捕獲に向けた衛星構体への金属弾撃ち込みに関する研究”, 第 16 回宇宙科学シンポジウム P-207, 神奈川, 2016 年 1 月.
- (4) グェン バ タイン ロン, 田中宏明, “衛星模擬構造への金属弾撃ち込みに関する実験と数値解析”, P09, 第 7 回 スペースデブリワークショップ, 東京, 2016 年 10 月.
- (5) グェン バ タイン ロン, 田中宏明, “衛星模擬構造への金属弾撃ち込みにおける金属弾先端角度と撃ち込み角度の影響評価”, 2B1-2, 平成 28 年度衝撃波シンポジウム, 神奈川, 2017 年 3 月.
- (6) グェン バ タイン ロン, 田中宏明, 波多英寛, “自由落下する物体への金属弾撃ち込みに関する試験と数値解析”, J1910105, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 埼玉, 2017 年 9 月.