

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04721

研究課題名（和文）冷間鍛造における摩擦係数の高精度同定と焼付きのリアルタイム検出・予測

研究課題名（英文）Precise identification of friction coefficient and real-time detection and prediction of seizure in cold forging

研究代表者

早川 邦夫（Hayakawa, Kunio）

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：80283399

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：冷間鍛造の潤滑評価について、潤滑特性の加工速度依存性の評価であり、環境対応潤滑剤に対する摩擦試験において、加工速度を高速および低速にて実験を行った。高精度な材料モデルを用いた較正曲線により、合理的な摩擦係数を同定し、高速における摩擦係数は、低速時におけるそれより小さいことを明らかにした。

また、ボルトに組み込まれた piezoelectric sensor により、潤滑状態の変化のリアルタイム検出・予測を試みた。その結果、試験片とダイスとの接触や充満の状態に応じた金型外径寸法の弾性変形が現れ、その変形をボルト型 piezoelectric sensor からの出力の変化によって捉えることが可能であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

冷間鍛造における摩擦係数の加工速度依存性の定量的評価およびそのメカニズムを明らかにできたが、このことは、潤滑剤の開発において、トライボシミュレーターが考慮すべき事柄を明確にし、また実際の潤滑剤の利用において、速度依存性の考慮に合理的な判断を与えた。

また、piezoelectric sensor における摩擦係数のリアルタイム測定の可能性を明らかにしたが、このことは、今後のより高精度なトライボシミュレーターの設計や潤滑特性評価に資するものである。また、この技術は、実加工中の不具合の検出にも応用可能である。

研究成果の概要（英文）：In the evaluation of lubrication in cold forging, the dependence of lubrication characteristics on processing speed was evaluated. A reasonable coefficient of friction was identified using calibration curves based on a precise material model, and it was clarified that the coefficient of friction at high speed is smaller than that at low speed.

Next, a piezoelectric sensor installed in a bolt was used to detect and predict changes in lubrication conditions in real time. As a result, it was shown that the elastic deformation of the outer diameter dimension of the die occurred in response to the contact between the specimen and the die and the filling state, and that this deformation could be detected by the change in output of the bolt-type piezoelectric sensor.

研究分野：塑性加工学

キーワード：冷間鍛造 潤滑 摩擦係数 piezoelectric sensor

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

冷間鍛造では、素材は金型に接触させながら流動し、複雑な部品形状が成形される。その成否に潤滑剤の性能が大きく影響する。冷間鍛造の潤滑剤としては、素材流動のための摩擦低減、金型表面への素材の凝着を抑制するための優れた表面拡大への追従性が求められる。その性能を満たす潤滑剤として、冷間鍛造においては、素材の表面に皮膜を化学的に生成する化成皮膜固体潤滑剤が永らく使用されてきたが、環境に対する負荷は大きいため、その代替として、素材表面への塗布と乾燥のみで使用可能な冷間鍛造用潤滑剤(塗布型または環境対応潤滑剤)が開発されてきた。日本では、2000年前後から実生産への適用が始まった。特に、欧州では、りん酸を用いない(Phosphate-free)潤滑剤として注目を集めている。

環境対応型潤滑剤の開発に合わせて、その潤滑性能を評価するための試験法が開発されてきた。申請者らも、前方押し型鍛造や後方押し型鍛造を模擬した試験法を開発してきた。前方押し型鍛造では、局所的に大きな圧力が素材に作用する。また後方押し型鍛造では、パンチ先端での素材の大きな表面積拡大が生じる。環境対応型潤滑剤がこれらに適應できるかどうかを調査することは実用化にむけて非常に重要である。

しかし、冷間鍛造の潤滑性能評価において、まだ達成できていない課題がいくつか存在する。それらのうち、潤滑特性の加工速度依存性の評価、および急激な潤滑状態の変化のリアルタイム検出・予測である。

2. 研究の目的

固体潤滑剤に対して、定性的に潤滑状態の加工速度依存性を指摘している論文は多くあるが、加工速度依存性を考慮した摩擦係数の同定という定量的な試みについては、国内外でまとまった研究成果はない。かつて、申請者らは、アルミニウムおよび鉄鋼材料について、加工速度の影響を考慮した固体潤滑剤の摩擦係数を同定しようとしたものの、摩擦係数の値が不合理なものとなってしまった。これは、摩擦係数を見積もる際に用いる較正曲線を作成する際の数値計算において、精度の低い変形抵抗曲線や熱伝達係数を用いたことが原因であった。そこで、本研究では、より高精度な材料(素材および工具)の変形抵抗曲線、熱伝達係数などの境界条件を用いて、より高精度な較正曲線を作成し、摩擦係数の加工速度依存性を明らかにする。

また、潤滑性能試験において、固体潤滑剤の素材変形への追従性が低いと、素材表面が工具に凝着する「焼付き」が発生する。従来では、焼付きの状況は、実験後の素材および工具表面の観察によりその程度を評価することのみが行われていた。申請者は、かつて工具の寿命の予測にアコースティックエミッション(AE)のフラクタル次元の適用について研究を進めた。その知見を生かして、本研究では、焼付きのような急激な潤滑状態の変化を定量的に検出するため、実験中の工具に作用する力(加速度)をピックアップし、その過渡情報を信号処理することで、焼付きの発生タイミングやその程度を定量化し、検出や予測技術に応用する。

3. 研究の方法

(1) 潤滑特性の加工速度依存性の評価

固体潤滑剤に対して、定性的に潤滑状態の加工速度依存性を指摘している論文は多くあるが、加工速度依存性を考慮した摩擦係数の同定という定量的な試みについては、国内外でまとまった研究成果はない。かつて、鉄鋼およびアルミニウム合金について、加工速度の影響を考慮した環境対応型固体潤滑剤の摩擦係数を同定しようとしたものの、摩擦係数の値が不合理であった。これは、摩擦係数を見積もる際に用いる較正曲線を作成する際の数値計算において、精度の低い変形抵抗曲線や熱伝達係数を用いたことが原因と考えられた。

そこで、本研究ではより高精度な材料(素材および工具)の変形抵抗曲線、熱伝達係数などの境界条件を用いてより高精度な較正曲線を作成し、摩擦係数の加工速度依存性を明らかにする。主な試験法として、後方押し型摩擦試験法を対象とした。

(2) 急激な潤滑状態の変化のリアルタイム検出・予測

潤滑性能試験において、固体潤滑剤の素材変形への追従性が低いと、素材表面が工具に凝着する「焼付き」が発生する。従来では、焼付きの状況は、実験後の素材および工具表面の観察によりその程度を評価することのみが行われていた。そこで、本研究では実験中の工具に作用する力(加速度)をピエゾ素子を組み込んだ固定用ボルト(ピエゾボルト)にてピックアップし、その過渡情報を信号処理することで、焼付きの発生タイミングやその程度を定量化し、検出や予測技術に応用する。

ここでは、冷温間チタン合金用の前方軸-後方押し型摩擦試験法を用い、試験中の摩擦の変化や凝着の際の変化を効果的に取得できるようにボルト取付け位置の検討、信号変化の解析を実施する。

4. 研究成果

(1) 潤滑特性の加工速度依存性の評価

図1は、WCL試験による μ_P - S_P 関係図を示す。ここで、WC試験で推定した μ_D は成形速度による差が確認できたため、各成形速度における μ_D の平均値(1spmでは $\mu_D=0.053$ 、20spmでは $\mu_D=0.042$)をWCL試験の校正線図に使用した。図1から、 μ_P は20spmの場合の方が1spmのそれよりも低く、速度依存性が認められる。

図2は、 $S_P=16$ mmにおける1spmと20spmの場合の試験直後の試験片の温度分布解析結果を示す。20spmの方が1spmよりも試験片の温度が高い。これは、成形速度が速いほど変形熱がパンチやダイスへ熱伝達する時間が短く断熱状態に近くなるためである。試験片が高温となることで材料の変形抵抗も下がる。また、2液2層型潤滑剤の融点は、上塗り層が179~180°C、下塗り層の一部である固体潤滑剤は175~180°Cの範囲である。図2から、20spmにおいて試験片全体は200°C以上であり、潤滑剤が融点に達した可能性がある。そのため、潤滑膜のせん断抵抗が減少することで、界面の滑りが良好となった可能性がある。さらに、WCL試験においては下パンチ面よりも上パンチ面のベアリング面積の方が広く、摩擦発熱によって上パンチ面の方がより高温となるため、この傾向は上パンチ面で先に生じやすいと考えられる。

図3は、1spmと20spmでの試験後の試験片の表面を示す。1spmでは潤滑剤の下塗り層が残存しているが、20spmでは下塗り層の膜切れが生じ金属表面が露出している。また、有限要素解析結果からも、ダイス面の一部で20spmの方が1spmよりも表面積拡大率が大きくなっており、ダイス面での過大な表面積拡大率により、20spmにおいては試験片の潤滑膜切れが生じたと考えられる。また、高温下での成形により潤滑膜が軟化し強度が低下した可能性も考えられる。ただし、工具のコーティング膜により、焼付き・凝着は生じなかった。

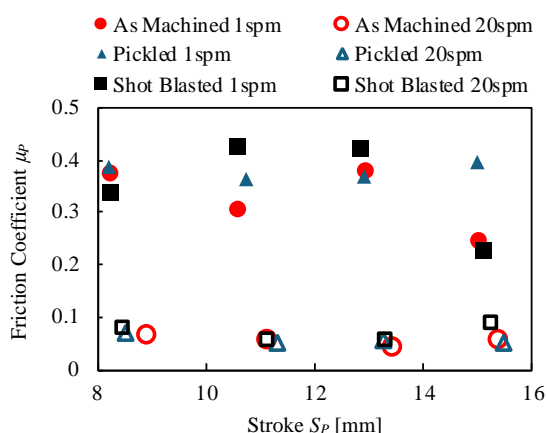


図1 パンチ面摩擦係数とストロークの関係

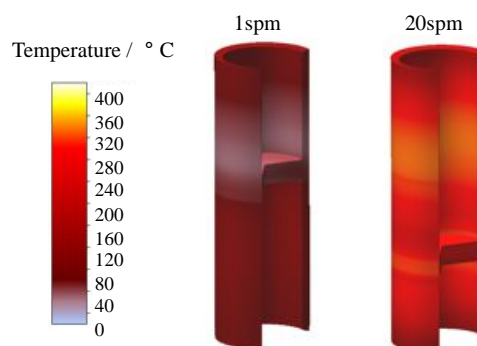


図2 解析による試験片温度分布

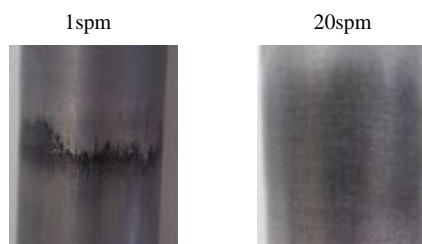


図3 試験後の試験片表面

(2) 急激な潤滑状態の変化のリアルタイム検出・予測

図4は、中村らが提案した前方軸-後方缶押し型(RC型)摩擦試験を参考に開発した、本研究のためのRC型試験の概念図を示す。ダイインサートとダイケースは締まり嵌めされている。テーパダイス面-素材間の摩擦係数 μ が大きいほど、前方押し量 S_f は小さく後方押し量 H_U は大きくなる。有限要素解析ソフトウェアSimufact Formingを用いて、 μ を変更してストローク S_P と H_U に関する校正線図を作成した。その後、試験後の試験片寸法から真の S_f を求め、校正線図にプロットし、内挿法を用いて μ を同定した。

図5は、ダイケース外周の円周方向変位を測定するためのリング型治具の概要を示す。この治具により、成形時に生じるダイスへの内圧による周方向変形を締結のためのボルト型ピエゾセンサの軸方向変形に変換してセンシングする。

表 1 は、実験条件を示す。試験片には大気酸化を行い、表面の酸化膜を厚くした。その時間 t_{oxid} を変更させて、膜厚の異なる試験片を用意した。

有限要素解析ソフトウェア Simufact Forming を用いて、治具取付け位置のリングの半径方向変位について解析を行った。表 2 は解析条件を、図 6 は解析結果を示す。図より、試験片温度が高いと半径方向変位の傾きが増加するストロークが小さくなるのがわかる。同様に、 μ が大きいと傾きの増加が生じるストロークが小さくなるのがわかる。形が進むにつれ半径方向変位が大きくなること、すなわち、この傾き増加のタイミングの違いにより、ダイス内部での摩擦係数の同定を試みた。

図 7 は、試験片温度ごとに求めた μ を示す。図より、試験片温度が大きくなると μ は大きくなり、ばらつきが大きくなっているのがわかる。また、冷間での試験では 1 回目のみ μ は他に比べて大きいのが、試験後の観察により酸化膜のはく離が他の試験片に比べて広範囲に亘っていた。

図 8 は、 $t_{oxid} = 20 \text{ min}$ 、加工温度 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ でのピエゾセンサーの出力波形を示す。また、同条件での出力電圧変化の傾きをとった図を図 9 に示す。図 9 を見ると、丸で囲った部分に変曲点がある。これは、冷間加工の 1 回目および温間での試験結果すべてに見られた。

成形開始から変曲点までの時間を t_{flex} とし、 μ との関係を表した図を図 10 に示す。図 10 よ

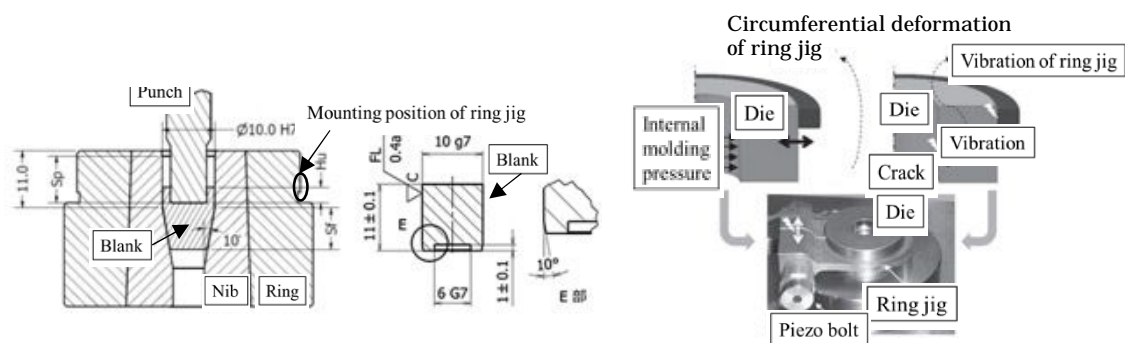


図 4 チタン合金の前方軸-後方缶押し型摩擦試験法

図 5 リング型治具の概要

表 1 リアルタイム検出のための実験条件

Blank Temperature, $^\circ\text{C}$	20	300	600
Punch stroke, mm	3.7		
Punch speed, mm/s	5		
Lubricant	Dry		
Atmospheric oxidation treatment duration t_{oxid}	20 min / 2 h		

表 2 工具弾性変形の解析条件

Blank temperature, $^\circ\text{C}$	20, 600
Punch stroke, mm	4.0
Punch speed, mm/s	5
Friction coefficient μ	0.1, 0.2, 0.3

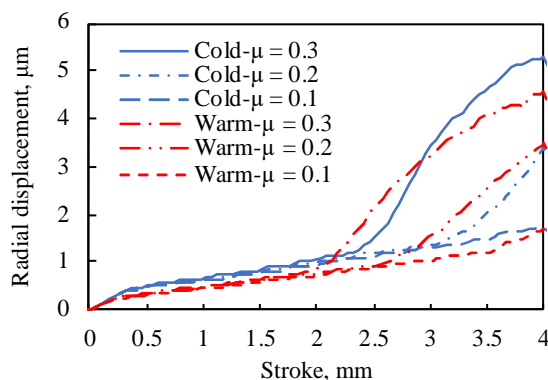


図 6 工具変形-ストローク関係の解析結果

り、同条件にて μ が大きいほど t_{flex} が小さいことがわかる。さらに、同程度の μ の場合、試験片温度が高いほど t_{flex} が小さくなる傾向にあることがわかる。解析より、 t_{flex} は試験片の充満時に対応する。実験では、 t_{flex} は酸化膜のはく離・凝着の違いによって変化する。また、試験片温度の t_{flex} に及ぼす影響については、温度による材料の変形抵抗の違いによって、充満のタイミングが変化する。以上から、試験片温度および t_{flex} の大きさから μ の推定ができるものと期待できる。また、 μ が大きくなった冷間 1 回目のように t_{flex} の有無で成形時の異常を検知することができることが期待される。

しかし、本研究では、室温での 1 回目の実験で見られたような凝着の発生を、センサーの出力から捉えることができず、今後の研究課題として残された。

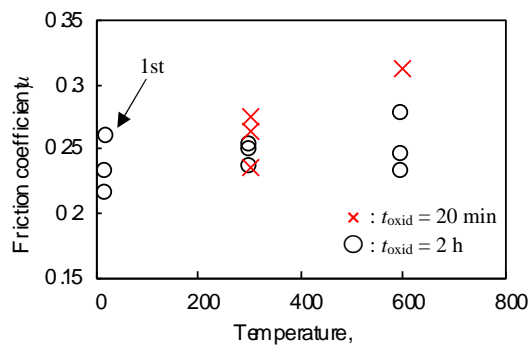


図7 摩擦係数と素材温度の関係

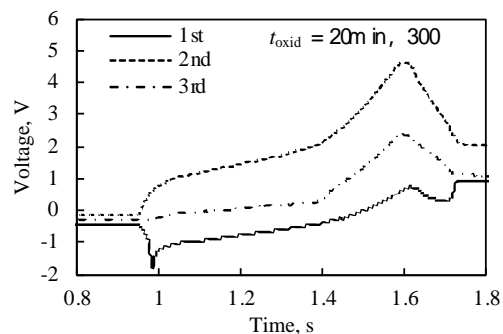


図8 センサー出力例（温間加工時）

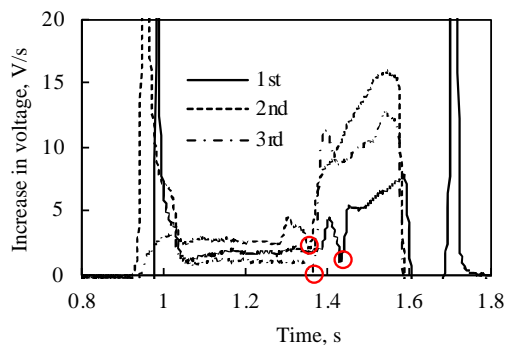


図9 センサー出力の時間増分

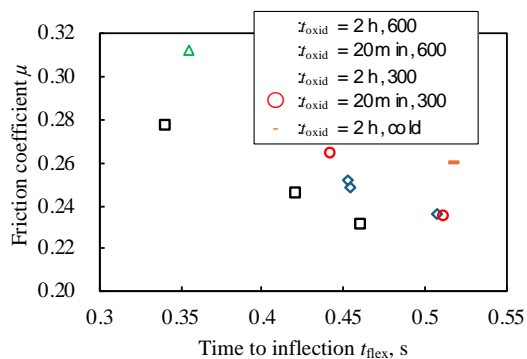


図10 摩擦係数とセンサー出力変曲点時刻の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 NISHI Genki, KUBOTA Yoshihiro, HAYAKAWA Kunio, NAKAMURA Tamotsu	4. 巻 63
2. 論文標題 Evaluation of Tribological Characteristics of Titanium Alloy by Cold and Warm Forward Rod-Backward Can Combined Extrusion Test	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity	6. 最初と最後の頁 145 ~ 150
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9773/sosei.63.145	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Atsuo, Hayakawa Kunio, Fujikawa Shinichiro	4. 巻 12
2. 論文標題 An Anisotropic Damage Model for Prediction of Ductile Fracture during Cold-Forging	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 1823 ~ 1823
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/met12111823	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Volz S., Launhardt J., Bay N., Hu C., Moreau P., Dubar L., Nielsen C., Hayakawa K., Kitamura K., Groche P.	4. 巻 72
2. 論文標題 International round robin test of environmentally benign lubricants for cold forging	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 CIRP Annals	6. 最初と最後の頁 245 ~ 250
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cirp.2023.03.019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Atsuo Watanabe, Kunio Hayakawa, Shinichiro Fujikawa
2. 発表標題 An Anisotropic Damage Model for Prediction of Ductile Fracture during Cold Forging
3. 学会等名 WCCM2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 早川邦夫, 久保田義弘, 高橋一平, 石橋格, 中村保
2. 発表標題 鋼材の冷間前 後方直缶押出しにおける環境対応型潤滑剤の成形速度依存性
3. 学会等名 2021年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西源貴, 久保田義弘, 早川邦夫, 中村保
2. 発表標題 チタン合金の温間前方軸 後方缶押出しにおける酸化膜のトライボロジー特性の温度依存性
3. 学会等名 2021年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Hayakawa, I. Takahashi, Y. Kubota, T. Nakamura, I. Ishibashi
2. 発表標題 Effect of production rate on lubrication performance in combined forward can - backward can cold extrusion test
3. 学会等名 The 13th International Conference on the Technology of Plasticity (ICTP 2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Nishi, Y. Kubota, K. Hayakawa, T. Nakamura
2. 発表標題 Temperature Dependency of Friction of Titanium Alloy by Forward Rod-Backward Can Combined Extrusion Test
3. 学会等名 International Conference on Tribology of Manufacturing Process (ICTMP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中根崇志, 早川邦夫, 鈴木英彦, 呂子蒙, 古澤樹
2. 発表標題 金属箔材の穴あけ工程における工具摩耗の測定とせん断面の観察
3. 学会等名 2023年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 早川邦夫
2. 発表標題 難加工材料の押出しにおけるトライボロジー特性の評価
3. 学会等名 第352回塑性加工シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kunio Hayakawa
2. 発表標題 Electro-Thermo-Mechanical Finite Element Analysis on SPS Sintering Process of Zirconia Part
3. 学会等名 International Conference on Advanced Functional Materials (AFMD-2024) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 指宿八洲, 久保田義弘, 早川邦夫
2. 発表標題 ピエゾセンサーによるチタン合金の鍛造におけるトライボロジー特性の評価
3. 学会等名 日本材料学会東海支部第18回学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	久保田 義弘 (Kubota Yoshihiro)	静岡大学・工学部・客員教授 (13801)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ドイツ	ダルムシュタット工科大学		