

博士論文（要約）

小型高感度な力検出
ピエゾ抵抗型カンチレバー

宇佐美貴徳

第 1 章 序論	3
1.1 本研究の目的	3
1.2 従来研究と研究課題	6
1.3 本研究の新規性と意義	8
1.4 論文の構成	10
第 2 章 理論と設計	11
2.1 諸言	11
2.2 ピエゾ抵抗型カンチレバーの理論	11
2.3 小型高感度な設計と Scale factor	13
2.4 カンチレバーに対する圧力と応力のシミュレーション	16
2.5 結言	22
第 3 章 金属蒸着膜を用いた FIB ナノ加工の提案手法と製作	23
3.1 諸言	23
3.2 ピエゾ抵抗型カンチレバーの製作プロセス	23
3.3 金属蒸着膜を介したピエゾ抵抗層に対する FIB 観察・加工とカンチレバー形成	31
3.4 試作した寸法の実測値と設計値の比較	35
3.5 一点荷重の力 F に対して高感度なカンチレバー形状	42
3.6 カンチレバー頭部寸法と製作限界	43
3.7 結言	44
第 4 章 実験と考察	45
4.1 諸言	45
4.2 ピエゾ抵抗型カンチレバーに力を加える実験	45
4.3 力に対する抵抗変化率と感度	47
4.4 実験結果の信頼性	56
4.5 共振周波数特性	58
4.6 Scale factor と感度	59
4.7 ピエゾ抵抗層の有効深さを考慮した Scale factor と感度の関係	62
4.8 カンチレバーの厚さと感度	67
4.9 結言	68
第 5 章 結論	69

第 6 章	付録	71
付録 A	提案手法によるピエゾ抵抗型カンチレバーのプロセスフロー	71
付録 B	本研究で使用した MEMS プロセス装置・計測機器・薬品・消耗品	76
付録 C	Cu 層を介した FIB 観察・加工	79
付録 D	ピエゾ抵抗型カンチレバーの試作に使用したマスクパターン	81
付録 E	Cr のパターニングによるカンチレバー脚長制御法	82
付録 F	ピエゾ抵抗型カンチレバーを用いた円環形状型慣性センサへの応用	83
参考文献		87
謝辞		93

第1章 序論

1.1 本研究の目的

本研究の目的は、従来研究よりも小型かつ、高感度に力の検出が可能な piezo 抵抗型カンチレバーを実現することである。

研究対象とする piezo 抵抗型カンチレバーは、Fig.1.1 に示すように piezo 抵抗層を形成した脚 2 本の片持ち梁構造である。このような構造は、主としてカンチレバー頭部で力 F や圧力 P を受け、脚(Fig.1.1 の Leg と記載の箇所)に歪 ϵ が生じる。piezo 抵抗型カンチレバーの場合、歪 ϵ が生じる前後の抵抗値を、それぞれ R および $R + \Delta R$ とすると、この歪 ϵ に比例した抵抗変化率 $\Delta R/R [-]$ が得られ[10-16]、1 N あたりの抵抗変化率 $\Delta R/R/F [N^{-1}]$ 、1 Pa の圧力あたりの抵抗変化率 $\Delta R/R/P [Pa^{-1}]$ が得られる[10]。以降、 $\Delta R/R/F [N^{-1}]$ を力に対する感度、 $\Delta R/R/P [Pa^{-1}]$ を圧力に対する感度と称する。脚 2 本構造とすることで、力 F や圧力 P に対する歪 ϵ が脚に生じ、これに比例して $\Delta R/R [-]$ が高まる構造である。カンチレバー頭部は力を受けるために必要な構造であり、抵抗変化は主に脚部で生じる。

これは式(1.1)及び式(1.2)のように表される。理論的には、 $l+l'$ の距離にあるカンチレバー頭部中心の一点に力 F が加わったと仮定したとき、力 F に対する感度 $\Delta R/R/F [N^{-1}]$ は脚の歪 ϵ に比例し、歪 ϵ はカンチレバーの脚幅 w と厚さ t の 2 乗に反比例し、脚長 l に比例する。 l' は頭部長/2 であり、 π は piezo 抵抗係数である。圧力に対する感度 $\Delta R/R/P [Pa^{-1}]$ についても脚の歪 ϵ はカンチレバーの脚幅 w と厚さ t の 2 乗に反比例する。また脚長 l と頭部面積 A に比例する。本研究では、脚幅 w 、厚さ t 、脚長 l 、頭部面積 A の 4 つのパラメータに着目し、式(1.1)右辺及び式(1.2)右辺を **Scale factor** と称する。そしてこの **Scale factor** を考慮した設計について理論的に検討を行うことで、小型化しても力に対し高感度な piezo 抵抗型カンチレバーの実現を試みる。

$$\frac{\Delta R/R}{F} \propto \frac{\pi \cdot \varepsilon}{F} \propto \frac{(l+l')}{w \cdot t^2} \quad (1.1)$$

$$\frac{\Delta R/R}{P} \propto \frac{\pi \cdot \varepsilon}{P} \propto \frac{A \cdot (l+l')}{w \cdot t^2} \quad (1.2)$$

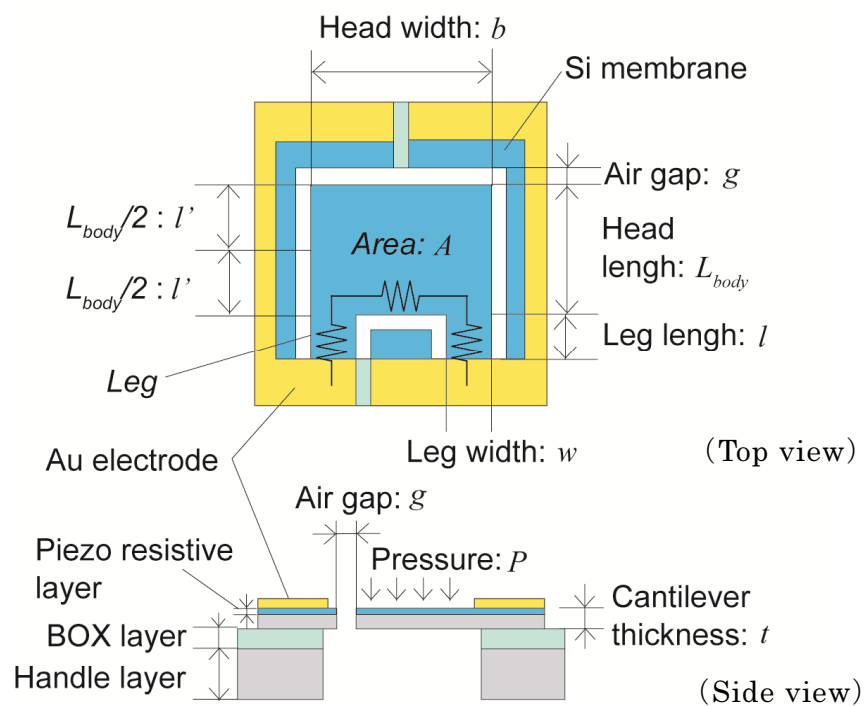


Fig.1.1 カンチレバーの概略図

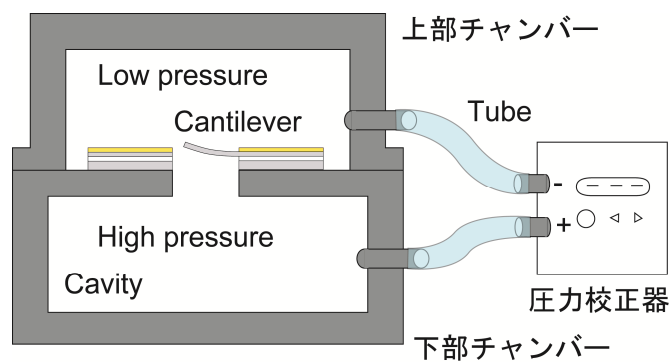


Fig.1.2 カンチレバーに力を加える概略図

pp.4 に記載の文章及び pp.6-86 は学術論文誌投稿予定
の内容のため、
2019年3月31日まで非公開

参考文献

- [1] J. McCarthy, et al., “FIB micromachined submicron thickness cantilevers for the study of thin film properties,” *Thin solid Films*, vol.358, pp.146-151, 2000.
- [2] A. A. Tseng, “Recent developments in micromilling using focused ion beam technology,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol.14, Number 4, pp.R15-R34, 2004.
- [3] W. Boxleitner, et al., “Simulation of topography evolution and damage formation during TEM sample preparation using focused ion beams,” *12th International Conference of Ion Beam Modification of Materials*, vol.175-177, pp.102-107, April, 2001.
- [4] A. J. Stecki, et al., “Low energy off-axis focused ion beam Ga⁺ implantation into Si,” *Journal of vacuum Science and Technology B*, vol.9, Issue 6, pp.B9, 2920, 1991.
- [5] J. Uegaki, et al., “Focused Ion Beam Milling System and Applications for Nano- and Micro- scale Fabrication, ” 日本学術振興会 荷電粒子ビームの工業への応用講演, 2007.
- [6] 室井光裕, “FIB装置を用いた微細加工, ” 筑波大学技術報告 24, 69-72, 2004.
- [7] N. Harjee, et al., “Coaxial tip piezoresistive scanning probes for high-resolution electrical imaging,” *The 23rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '10)*, pp.344-347, 2010.
- [8] N. Satoh et al., “Multi-probe atomic force microscopy using piezo-resistive cantilever and interaction between probes,” *Journal of Surface science and nanotechnology*, vol.11, pp.13-17, 2013.
- [9] A. Quist et al., “Piezoresistive cantilever based nanoflow and viscosity sensor for microchannels,” *Lab on a chip*, vol.6, pp.1450-1454, 2006.
- [10] 高橋 英俊, “昆虫羽ばたき飛翔における翼面圧力差計測,” 東京大学大学院情報理工学系研究科博士論文, 2010.
- [11] M. Gel, “Force Sensing Piezoresistive Probes for Biophysical Manipulation,” 東京大学大学院情報理工学系研究科博士論文, 2004.
- [12] M. Gel and I. Shimoyama, “Force sensing submicrometer thick cantilevers with ultra-thin piezoresistors by rapid thermal diffusion”, *Micromechanics and*

- Microengineering*, vol. 14, pp. 423-428, 2004.
- [13] 桑名健太, “メサ構造を持つピエゾ抵抗カンチレバーを用いた細胞膜受容体密度のラベルフリー計測法,” 東京大学大学院情報理工学系研究科博士論文, 2009.
- [14] 田中 悠輔, “ピエゾ抵抗型カンチレバーを用いた3軸触覚センサチップ,” 東京大学大学院情報理工学系研究科修士論文, 2008.
- [15] 細野美奈子, “埋め込み型せん断ひずみセンサの設計論,” 東京大学大学院情報理工学系研究科博士論文, 2011.
- [16] 野田堅太郎, “直立ピエゾ抵抗カンチレバーを用いた皮膚状触覚センサに関する研究,” 東京大学大学院情報理工学系研究科博士論文, 2008.
- [17] T. Yutaka, et al., “A piezoelectric cantilever-type differential pressure sensor for a low standby power trigger switch,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 23, pp. no.12, article no. 125024, 2013.
- [18] N. Minh-Dung, et al., “A barometric pressure sensor based on the air-gap scale effect in a cantilever,” *Applied Physics Letters*, vol.103, no.14, article no.143505, 2013.
- [19] H. Takahashi et al., “Differential pressure distribution measurement for the development of insect-sized wings,” *Measurement Science and Technology*, vol.24, no.5, article no. 055304, 2013.
- [20] H. Takahashi et al., “Simultaneous detection of particles and airflow with a MEMS piezoresistive cantilever,” *Measurement Science and Technology*, vol. 24, no. 2, article no. 025107, 2013.
- [21] H. Takahashi, et al., “Differential pressure distribution measurement with an MEMS sensor on a free-flying butterfly wing,” *Bioinspiration & Biomimetics*, vol.7, no. 3, article no. 036020, 2012.
- [22] H. Takahashi et al., “Differential pressure sensor using a piezoresistive cantilever,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol.22, no. 5, article no. 055015, 2012.
- [23] Y. Takei et al., “Anterior And Posterior Tongue Activity Sensor Based On Triaxial Force Sensor,” *The 26th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '13)*, pp. 1093-1096, Taipei, Taiwan, 20-24 January, 2013.
- [24] U. Jung et al., “A Piezoresistive Cellular Traction Force Sensor,” *The 26th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '13)*, pp. 927-930, Taipei, Taiwan, 20-24 January, 2013.

- [25] N. Minh-Dung, et al., “A Sensitive Liquid-Cantilever Diaphragm For Pressure Sensor,” *The 26th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '13)*, pp. 617-620, Taipei, Taiwan, 20-24 January, 2013.
- [26] N. Minh-Dung, et al., “A hydrophone using liquid to bridge the gap of a piezo-resistive cantilever,” *The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '13)*, pp. 70-73, Barcelona, Spain, 16-20 June, 2013.
- [27] H. Takahashi, et al., “Particle Sensor usijng an Ultra-thin Piezo Resistive Cantilever”, *Proceedings of IEEE 7th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS2012)*, Kyoto, Japan, pp. 826-827, Mar. 5- 8, 2012.
- [28] C. M. Kolera, et al., “Measuring the Aerodynamic Forces on a small particle attached to a wall,” *Experiments in Fluids*, vol.39, Issue 2, pp.455-463, 2005.
- [29] J. Wu, et al., “A Simple Method to Integrate In Situ Nano-Particle Focusing with Cantilever Detection”, *Sensors Journal*, IEEE, vol.7 Issue 6, pp.957-958, June, 2007.
- [30] N. Noeth, et al., “Cantilever-based micro-particle filter with simultaneous single particle detection,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol.21,pp.054022,1-6, 2011.
- [31] Philip S. waggoner and Harold G. Craighead, “Micro- and nanomechanical sensors for environmental, chemical, and biological detection,” *Lab on a Chip*, Vol.7. pp.1238-1255, 2007.
- [32] S. Dohn, et al., “Position and mass determination of multiple particles using cantilever based mass sensors,” *Applied Physics Letters*, Vol.97, Issue 4, p.044103,2010.
- [33] S. Dohn, et al., “Enhanced Functionality of Cantilever based Mass sensors using Higher Modes and Functionalized Particles,” *The 13th International Conference on the Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, vol.1, pp.636-639, June, 2005.
- [34] J. Wang, et al., “Chemisorption sensing and analysis using silicon cantilever sensor based on n-type metal-oxide-semiconductor transistor,” *Microelectronic Engineering*, Vol.88, Issue 6, pp.1019-1023, June, 2011.
- [35] N. Minh-Dung,et al., “3D Airflow Velocity Vector Sensor,” *The 24th IEEE*

- International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2011)*, pp. 513-516, Cancun, Mexico, January 23-27, 2011.
- [36] M. Li, et al., "Ultra-sensitive NEMS-based cantilevers for sensing, scanned probe and very high-frequency applications," *Nature Nanotechnology*, Vol.2, issue 2, pp114-120, 2007.
- [37] N. Minh-Dung, et al., "Sound Direction Sensor with an Acoustic Channel," *The 23rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 10)*, pp. 655-658, Hong Kong SAR, China, January 24-28, 2010.
- [38] X. Li, et al., "Integrated MEMS/NEMS Resonant Cantilevers for Ultrasensitive Biological Detection," *Journal of Sensors*, article ID 637874, 2009.
- [39] Y. Yang, et al., "Nano-thick resonant cantilevers with a novel specific reaction-induced frequency-increase effect for ultra-sensitive chemical detection," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol.20, number 5, 2010.
- [40] B. Park, et al., "Real-time detection of airborne dust particles using paddle-type silicon cantilever," *Journal of Vacuum Science and Technology*, Vol.27, issue 6, pp.3120, 2009.
- [41] X. Xia, et al., "Nano-thickness Integrated Resonant Cantilevers with Surface-Stiffening Scheme for Ultra-Sensitive Detection of Trace Chemicals," *IEEE 22nd International Conference on the Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2009)*, pp328-331, Jan, 2009.
- [42] H. Takahashi, et al., "Differential pressure sensor using a piezoresistive cantilever," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol.22 pp.055015, 2012.
- [43] H. Takahashi, et al., "Differential Pressure Distribution Measurement of a Free-Flying Butterfly Wing," *16th International Conference on Solid-state sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2011)*, Beijing, China, pp.2022-2025, June 5-9, 2011.
- [44] N. Minh-Dung, et al., "Barometric Pressure Change Measurement," *The 16th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2011)*, Beijing, China, June 5-9, 2011.
- [45] M.X. Zhou, et al., "A novel capacitive pressure sensor based on sandwich structures," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 14, pp.1272-1282, 2005.

- [46] C.B. Sippola and C.H. Ann, "A thick film screen-printed ceramic capacitive pressure microsensor for high temperature applications," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, pp. 1086-1091, 2006.
- [47] C.-L. Dai, et al., "Capacitive micro pressure sensor integrated with a ring oscillator circuit on Chip," *Sensors Journal*, vol. 9, pp.10158-10170, 2009.
- [48] J.N. Palasagaram and R. Ramadoss, "MEMS capacitive pressure sensor fabricated using printed circuit processing techniques," *Sensors Journal*, vol. 6, no. 6, pp. 1374-1375, 2006.
- [49] H. Baltes, O. Brand, "CMOS-based microsensors and packaging," *Sensors and Actuators A*, vol. 92, pp. 1-9, 2002.
- [50] A.V. Chavan and K.D.Wise, "Batch-processed vacuum-sealed capacitive pressure sensors," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 10, no. 4, pp. 580-588, 2001.
- [51] C.L. Dai, et al., "Modeling and fabrication of micro FET pressure sensor with circuits," *Sensors Journal*, vol. 7, pp. 3386-3398, 2007.
- [52] T. Usami, et al., "50 nm-thick piezo-resistive cantilever," *Proceedings of IEEE 7th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS2012)*, Kyoto, Japan, pp.1003-1004, Mar. 5-8, 2012.
- [53] E.S ヤン, "半導体デバイスの基礎", マグロウヒル出版, 1993.
- [54] J. Llobet, et al., "Fabrication and operation of nanomechanical structures defined by focused ion beam implantation," *Proceedings of IEEE 7th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS2012)*, Kyoto, Japan, pp.376-377, Mar. 5-8, 2012.
- [55] Y.G. Jiang, et al., "Fabrication of piezoresistive nanocantilevers for ultra-sensitive force detection," *Measurement Science and Technology*, Vol.19, Number 8, p.084011, August, 2008.
- [56] X. Li, et al., "Study on Ultra-Thin NEMS Cantilevers-High Yield Fabrication and Size-Effect on Young's Modulus of Silicon," *The 15th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp.427-430, 2002.
- [57] H.Takahashi, et al., "Self-sensing pizoresistive cantilever and its magnetic force microscopy applications," *Proceedings of the third International Conference on Scanning Probe Microscopy, Sensors and Nanostructures*, Vol.91, Issues 1-4, pp.63-72, May, 2002.
- [58] W.W. Jang, et al., "NEMS switch with 30 nm-thick beam and 20 nm-thick air-gap

- for high density non-volatile memory applications,” *International Semiconductor Device Research Symposium (ISDRS 2007)*, Vol.52, Issue 10, pp.1578-1583, October, 2008.
- [59] P. Ivaldi, et al., “50 nm Thick AlN Resonant Micro-Cantilever for Gas Sensing Application,” *International Frequency Control Symposium (FCS)*, pp.81-84, June, 2010.
- [60] T. C. Duc, et al., “Lateral nano-Newton force-sensing piezoresistive cantilever for microparticle handling,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.16, Number 6, 2006.
- [61] J. G. E. Harris, et al., “Fabrication and characterization of 100-nm-thick GaAs cantilevers,” *American Institute of Physics, Review of Scientific Instruments*, Vol.67, Issue 10, pp.3591-3593, Oct, 1996.
- [62] R. Amarasinghe et al., “Design and Fabrication of Piezoresistive Six Degree of Freedom Accelerometer for Biomechanical Applications,” *Proceedings of the 2004 International Conference on MEMS*, pp.148-154, 2004.
- [63] 佐藤,今井,新井, “SOI構造における酸化膜/シリコン界面への隣のパイルアップ現象とnウェル濃度シミュレーション,” *電子情報通信学会技術研究報告*, 電子デバイス 94 (230) ,pp.23-28. 1994.

謝辞

本論文の内容は、2010年から2014年にかけて東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻マイクロ知能システム研究室で行った研究をまとめたものである。

指導教員である下山勲教授には、研究計画から実験手順、計測の手法、考察や課題に対する提案も含めたご指導と議論をさせて頂いた。また論文執筆時にはデータのまとめ方だけでなく、一つ一つ工学の言葉で述べ、議論することの大切さと楽しさをお教え頂くとともに、先生の姿勢を通して、研究に対する態度についてご指導を受けることができた。

東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻の中村仁彦教授、同大学生産技術研究所の藤田博之教授、同大学工学系研究科機械工学専攻の中尾政之教授、同大学生産技術研究所の竹内昌治准教授には博士論文審査を引き受けて頂き、論文のまとめ方についてご指導を頂くとともに、今後の研究について多くのご提言を頂いた。ピエゾ抵抗型カンチレバーに関する基礎研究から応用研究まで、ご指摘とご提案頂いたことにつきまして、今後の研究テーマ及び成果に繋げていければと存じます。

所属研究室の松本潔特任教授には、計測にあたって電気回路や周波数特性の調査の際にご指導を頂いた。同じく高畑智之講師には、今後の研究計画について毎週数時間のお時間を頂きご相談させて頂き、SIMS分析の計画や実験計画、材料力学の基礎から Mathematica を用いた感度計算、カンチレバーのシミュレーション手法と考察に多くのご指導を頂いた。菅哲朗助教には、プロセスから実験計画、また発表方法について多くのご指摘を頂き、とくに本研究の応用として慣性センサの実験計画についてご指導頂いた。また中井亮仁特任助教には、実験結果の考察に時間を割いて議論をさせて頂くとともに、製作や研究計画について多くのご提言を頂いた。竹井裕介特任助教には、博士1年のときからピエゾ抵抗型カンチレバーの基礎、従来の応用やご自身の研究例も踏まえて研究計画をご相談させて頂いた。また博士論文をまとめるにあたりご指導頂いた。野田健太郎特任助教には、クリーンルームの MEMS 関連装置と薬品の使用方法、カンチレバープロセスについてご指導頂いた。製作と計測の現場で居合わせるが多かったため、プロセスや計測方法についての疑問点を率直に議論することができた。博士論文の校正にも時間を割いて頂き、この場をかりて感謝とともに御礼申し上げます。阮平謙特任助教には、主としてピエゾ抵抗型カンチレバーの理論についてご相談をさせて頂いた。また私が興味のある3軸力検出ピエゾ抵抗型カンチレバーや、パリレン封止についてもご相談をさせて頂きました。同研究室の高橋英俊特任助教にも、私の隣の席であったが、実験計画や計測手法についてご相談させて頂いた。ご本人の研究や仕事がある中、いつでもその手を止めて丁寧に質問に答えて頂

けたこと、有り難くまた感謝とともに御礼申し上げます。2013年秋から、竹内研究室から下山研究室に来られた平山佳代子特任研究員には、本論で試作したピエゾ抵抗型カンチレバーを用いた、筋細胞の力の計測について日々ご指導を頂いております。また本研究ではロックインアンプ回路を用いてピエゾ抵抗型カンチレバーの波形を得たが、この回路は所属研究室の技術補佐員の仲村隆さんが自ら作り上げたものであり、仲村さんには電気回路から計測まで丁寧にご教授頂いた。いつも朝早く出勤され、仕事に対する態度や姿勢に共感するとともに、心からの御礼を申し上げます。

FIB を用いたエッチング加工について学内に技術的な指導が可能な専門家が少ない中、同研究室の安食嘉晴研究員には FIB の使い方を一から教えて頂いた。社会人でありながら夕刻から丑三つ刻まで面倒を見て頂いたこともあり、また日々の研究でもご指導頂いた。また武田先端知ビルにあるスーパークリーンルームの Xvision200TB FIB-SEM 装置担当であり、東京大学大学院工学系研究科総合研究機構杉山研究室の久保田雅則助教には、FIB 装置の立ち下げ方法から使い方までご教授頂いた。とくに FIB 装置は共用装置であるため、しばしばエラーが生じる。装置の使用率の高い私にとってはエラーに遭遇する機会も多いが、その度に久保田先生にアドバイスを頂くとともに、迅速な対応を頂き、ストレスなく存分に装置を使用することができた。また学外において Xvision200TB FIB-SEM の製造元であり、外部委託業務として FIB 加工サービスをされておられる、SII のセイコーアイテクノロジー株式会社 FIB 技術部の石井隆行様には、エッチング加工における長年のノウハウをご教授頂いた。とくに私が SII に出向いた際には半日近くお時間を頂き、共に FIB 装置を使用させて頂き、議論をさせて頂きました。

また博士課程より下山研究室に所属し、MEMS 分野を一から始めた私は、これまで研究室内の多くの学生に支えられてきた。博士課程 1 年のときにクリーンルームの班長をさせて頂いた折には、研究室の先輩である細野美奈子客員研究員には、薬品管理からクリーンルームの使用方法、カンチレバープロセスをお教え頂いた。同博士課程の稲葉亮君には日々の研究で多くの助言を頂くとともに、他の学生の模範となる態度で研究に打ち込んでいたその姿に、大変共感を覚えます。LG chemicals のユ・クアンヒョン君とは、研究から日常生活まで本音で語り合うことができた。研究室で初めてグラフェンを用いた研究を開拓した精神と、私の隣の席であったが日々努力をする姿に共感を覚えるとともに、目標とした研究者の一人として尊敬申し上げます。同博士課程の磯崎瑛宏さんとは MEMS 分野における研究分野こそ異なるが、ピエゾ抵抗型カンチレバーの理論について多くの助言を頂いた。グエンミンジュン君には、実験セットアップから圧力を加える計測実験、データのまとめ方まで、多くの助言を頂いた。チョン・イジンさんにはカンチレバー製作における装置の使用についてご指導を頂き、互いにカンチレバーを研究する者として議論をさせて頂いた。博士課程 2 年のグエン・タン・ヴィン君には高感度なカンチレバーについて情報

共有をするとともに、日々研究テーマに繋がるアイデアや応用について自由に議論が行えたこと、この場をかりて感謝致します。また陳文静さんとは、Au 蒸着についてご相談させて頂くとともに、日々努力する姿勢に共感致します。博士課程1年の塚越拓哉さんとは、本研究で試作したピエゾ抵抗型カンチレバーを用いた筋細胞の計測にご一緒させて頂き、実験環境と計測について議論をさせて頂いた。修士課程の松井一真君とは、FIB加工とカーボンデポジションについて情報共有を行うとともに議論をさせて頂いた。所属研究室内外の多くの方にお世話になりましたこと、改めて感謝とともに御礼申し上げます。