

平成28年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書
〔追跡評価用〕

平成28年 4月22日現在

研究代表者 氏名	グン 剣萍	所属研究機関・ 部局・職 (研究期間終了時)	北海道大学・先端生命科学研究院・ 教授
研究課題名	生命科学の時代が求める新材料-ソフト&ウェットマテリアルの創製		
課題番号	18002002		
研究組織 (研究期間終了時)	研究代表者 グン 剣萍（北海道大学・先端生命科学研究院・教授） 研究分担者 角五 彰（北海道大学・理学研究院・准教授） 黒川 孝幸（北海道大学・創成研究機構・特任助教）		

【補助金交付額】

年度	直接経費
平成18年度	81,400 千円
平成19年度	90,800 千円
平成20年度	91,700 千円
平成21年度	43,900 千円
平成22年度	43,900 千円
総計	351,700 千円

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)~(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

水を 90 wt%も含むゲルは、従来、ゼリーのような脆い素材として認識されてきた。これに対して研究代表者らは、軟骨やゴムに匹敵する驚異的な強度と靱性を示すダブルネットワークゲル (DN ゲル) を世界で初めて開発し、本常識を覆した。特別推進研究では、DN ゲルの破壊機構を精力的に研究した結果、【硬くて脆い電解質網目と柔らかく伸縮性の高い中性網目の 2 重網目構造を有する DN ゲルの高靱性化は、脆い網目の内部破壊によって起こる】というメカニズムを解明した。DN ゲル中の「壊れやすい」成分が、亀裂先端の応力集中を緩和するとともに、大きな破壊エネルギーを散逸し、結果として高靱性をもたらすという、斬新な機構を発見した。これは、従来の材料の高強度化戦略とは全く異なるものである。

研究代表者らは特別推進研究終了後、DN ゲルの高靱性化機構をより普遍的な原理へ拡張し、「**犠牲結合によるゲルの高靱性化原理**」を考案した。科研費基盤 S の補助を受け、この原理の証明を進めている。具体的には、脆い電解質網目に限らず、多様な種類の壊れやすい内部構造 (犠牲結合と総称) をゲルに導入することで、DN ゲル同様の内部破壊によるエネルギー散逸と高靱性化の実現を目指している。この強靱化理論「犠牲結合理論」を実証できれば、ゲルに限らず、高靱性化する汎用的アプローチとして、他の高靱性ソフトマテリアルを設計する上での普遍則となると期待される。実際に基盤 S 研究では、化学結合のみならず、イオン結合、水素結合、疎水結合などの物理結合を犠牲結合として導入したゲルが高靱性化することを証明した。さらに、ラメラ構造や相分離構造などの超構造・階層構造も破壊時にエネルギーを散逸し、広い意味で一種の「超構造犠牲結合」とみなすことができると解明した。これらの複数の系における結果から、「**犠牲結合によるゲルの高靱性化**」という原理の普遍性を証明した。

研究代表者らはさらに、犠牲結合原理に基づき、高靱性と種々の高機能を両立するゲルを創製した。例えば、イオン結合を可逆的な犠牲結合として使う**高靱性ゲルは、切断しても自発的にほぼ 100%修復する**。この材料は、「**何度でも使える材料**」として利用出来る。この成果は Nature Materials (2013) に掲載され、材料科学分野における被引用数が世界上位 1% の論文として選定された。また、ラメラ超構造を犠牲結合として持つゲルは、ラメラ超構造による発色、微小変形時は高分子の弾性変形による高速応答、大変形時はラメラ超構造の可逆的な破壊による高靱性、という三つの機能を巧みに集積することで、力学刺激に応答して**1 ミリ秒の速さで変色し、その発色特性は 1 万回もの変形を加えても劣化しない**、という優れた構造色ゲルを創製した。この材料は、「**靱帯・腱・筋肉の複雑な変形をリアルタイムでマッピングするセンサー**」として利用できる。この成果は Nature Communications (2014) に掲載された。

基盤 S の研究進捗評価においては、最高ランクである A+ (当初目標を超える研究の伸展があり、期待以上の成果が見込まれる) の評価を得ている。以下のような評価コメントを得ている。

「本研究は、ダブルネットワーク (DN) ゲルの高靱性が研究代表者の提唱する「犠牲結合原理によるものとし、この原理の普遍性を中性網目、ゲル微粒子、物理結合を特徴とする 3 種類のゲル系について証明し、その原理が種々の材料の補強法として普遍的な手法と成り得ることを示した。さらに、構造色ゲルや生化学機能を併せ持つゲルなど、「犠牲結合」を応用した創発機能を持つ高靱性ゲルの開発も多数手がけた。これらの成果は顕著であり、Nature Materials をはじめとする多くのハイインパクトジャーナルへの論文掲載、受賞・招待講演、特許などとして現れている。今後は、医療用や産業用高靱性ゲルなど実用化に向けた展開を期待する。」

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

特別推進研究の研究期間終了後の2011年から、原著論文80報、総説25報を発表した。海外の招待講演における発表は30件（うち基調講演6件）。主な発表論文、招待講演は以下の通り。

【原著論文】

- 1) H. Zhang, T.L. Sun, A. Zhang, T. Nakajima, T. Nonoyama, T. Kurokawa, O. Ito, H. Ishitobi, J.P. Gong. Tough Physical Double Network Hydrogels Based on Amphiphilic Tri-block Copolymers. **Advanced Materials**, in press, 2016
- 2) K. Sato, T. Nakajima, T. Hisamatsu, T. Nonoyama, T. Kurokawa, J.P. Gong. Phase Separation-Induced Anomalous Stiffening, Toughening, and Self-healing of Polyacrylamide Gels. **Advanced Materials**, 27, 6990, 2015
- 3) Y. Yue, T. Kurokawa, M.A. Haque, T. Nakajima, T. Nonoyama, X. Li, I. Kajiwara, J.P. Gong. Mechano-actuated Ultrafast Full-Colour Switching in Layered Photonic Hydrogels. **Nature Communications**, 5, 4659, 2014
- 4) R. Takahashi, Z.L. Wu, M. Arifuzzaman, T. Nonoyama, T. Nakajima, T. Kurokawa, J.P. Gong. Control Superstructure of Rigid Polyelectrolytes in Oppositely Charged Hydrogels via Programmed Internal Stress. **Nature Communications**, 5, 4490, 2014
- 5) T.L. Sun, T. Kurokawa, S. Kuroda, A.B. Ihsan, T. Akasaki, K. Sato, M.A. Haque, T. Nakajima, J.P. Gong. Physical Hydrogels Composed of Polyampholytes Demonstrate High Toughness and Viscoelasticity. **Nature Materials**, 12, 932-937, 2013
- 6) Y. Yue, M.A. Haque, T. Kurokawa, T. Nakajima, J.P. Gong. Lamellar Hydrogels with High Toughness and Ternary Tunable Photonic Stop-Band. **Advanced Materials**, 25, 3106-3110, 2013
- 7) T. Nakajima, T. Kurokawa, S. Ahmed, W. Wu, J.P. Gong. Characterization of Internal Fracture Process of Double Network Hydrogels under Uniaxial Elongation. **Soft Matter**, 9, 1955-1966, 2013
- 8) J. Hu, T. Kurokawa, T. Nakajima, T.L. Sun, T.C. Suekama, Z.L. Wu, S.M. Liang, J.P. Gong. High Fracture Efficiency and Stress Concentration Phenomenon for Microgel-Reinforced Hydrogels Based on Double-Network Principle. **Macromolecules**, 45, 9445-9451, 2012
- 9) T. Nakajima, H. Sato, Y. Zhao, S. Kawahara, T. Kurokawa, K. Sugahara, J.P. Gong. A Universal Molecular Stent Method to Toughen any Hydrogels Based on Double Network Concept. **Advanced Functional Materials**, 22, 4426-4432, 2012
- 10) M.A. Haque, T. Kurokawa, G. Kamita, J.P. Gong. Lamellar Bilayers as Reversible Sacrificial Bonds To Toughen Hydrogel: Hysteresis, Self-Recovery, Fatigue Resistance, and Crack Blunting. **Macromolecules**, 44, 8916-8924, 2011

【総説】

- 1) J.P. Gong. Materials both Tough and Soft. **Science**, 344, 161-162, 2014
- 2) M.A. Haque, T. Kurokawa, J.P. Gong. Super Tough Double Network Hydrogels And Their Application As Biomaterials. **Polymer**, 53, 1805-1822, 2012
- 3) Z.L. Wu, J.P. Gong. Hydrogels with Self-Assembling Ordered Structures and their Functions. **NPG Asia Materials**, 3, 57-64, 2011
- 4) Z.L. Wu, T. Kurokawa, J.P. Gong. Novel Developed Systems and Techniques Based on Double-Network Principle. **Bulletin of the Chemical Society of Japan**, 84, 1295-1311, 2011（日本化学会学術賞受賞総説）

【国際会議での招待講演】

- 1) Gordon Research Conference on Adhesion Science 2011, Lewiston, Maine, USA, 2011
- 2) 2012 Conference on Deformation, Yield and Fracture in Polymers, Kerkrade, The Netherlands, 2012
- 3) The 2012 Gordon Research Conference on Polymer Physics, July 25, South Hadley, Massachusetts, USA, 2012
- 4) "Marine Biosurfaces and Interfaces" Symposium at the 245th ACS National Meeting, New Orleans, LA, USA, 2013
- 5) Pressure Sensitive Tape Council Meeting, Nashville, TN, USA, 2014
- 6) IUPAC World Polymer Congress 2014, Chiang Mai, Thailand, 2014 (DSM Materials Sciences Award 2014 受賞講演)
- 7) "Fracture of double network hydrogels," SoftComp topical workshop "FRACTURE OF SOFT MATERIALS: from soft solids to complex fluids", Palavas-les-Flots, France, 2014
- 8) 2015 Eastman Lecture, NC, USA, 2015
- 9) 10th Annual European Rheology Conference (AERC 2015), Nantes, France, 2015
- 10) 5th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM2015), Durham Convention Center, Durham, NC, USA, 2015
- 11) The 14th Pacific Polymer Conference: Polymer Physics and Processing: Networks and Gels, Kauai, Hawaii, USA, 2015
- 12) Pacificchem 2015: Polymer Gels as Advanced Soft Materials, Honolulu, Hawaii, USA, 2015

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）**(3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）**

研究代表者：グン剣萍

研究種目：文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(S)

研究課題名：「犠牲結合原理」の普遍性の証明と多様な犠牲結合による高靱性・高機能ゲルの創製研究

研究期間：平成 24～28 年度（2012～2016）

研究期間全体の配分額：計 209600 千円

研究代表者：グン剣萍

制度担当府省等：内閣府

制度名：JST 革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)「超薄膜化・強靱化「しなやかなタフポリマー」の実現（PM:伊藤耕三）

研究課題名：タフポリマーの実現に向けた高靱性ゲルの創製と破壊機構の解明

研究期間：平成 26～30 年度（2014～2018）

研究期間全体の配分額：計 170000 千円

(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

特別推進研究の大きな成果は【DN ゲルの高強度化メカニズムの解明】である。DN ゲルの破壊機構を精力的に研究した結果、DN ゲル中の「壊れやすい」成分が、大きな破壊エネルギーを散逸することで、大きな破壊抵抗を生み、結果として高靱性をもたらすというこれまでの高強度ゲルと全く異なる機構を発見した。本成果を背景に、基盤 S 研究では、「犠牲結合によるゲルの高靱性化」という普遍原理を提案し、化学結合のみならず、物理結合も犠牲結合としてゲルを高靱性化することを解明した。物理結合が可逆的な犠牲結合として働き、破壊と修復が繰り返すことで、材料に自己修復性、耐久性、衝撃吸収性をもたらすことを解明した。さらに、ラメラ構造や相分離構造などの超構造・階層構造も破壊時にエネルギーを散逸、広い意味で一種の「超構造犠牲結合」とみなすことができると解明した。「犠牲結合によるゲルの高靱性化」原理の発見は、高分子ゲルに限らず、他の高靱性ソフトマテリアルを設計する上での普遍則となる。また、これらの知見は、筋肉・腱などの生体組織の優れた力学物性を解明する糸口となる。

犠牲結合による高靱性原理の発見は、従来の高強度材料設計とは全く異なる新しい戦略を与えるものであり、高い学術的価値と応用価値を持っている。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

研究代表者らが解明した「犠牲結合によるソフトマテリアルの高靱性原理」は、ゲル材料にとどまらず、生体組織の高強度化機構の解明や様々な新規高強度材料の設計にも適用する一般原理として学術的に高い価値がある。また、高靱性ゴムやプラスチックなどの工業用高分子材料の設計にも適用できるため、関連分野へ大きな波及性がある。そのエビデンスとして、以下のことが挙げられる。

◎ 研究代表者らの招待講演や依頼講演の数は、特別推進研究が始まった2006年以降、過去10年間で既に180回を越え、米国物理学会を始め、様々な分野の国際会議において大きく取り上げられている。

◎ Web of Scienceによると、特別推進研究が終わってからのこの5年間、論文の被引用数が急速に増加し、特にこの2年間毎年の被引用数は1100回を超える（図1）。沢山の論文がNature、Science、Advanced Materials、JACSなど高インパクトファクターの学術誌や定評が高い学術誌に引用されている（表1）。

◎ InCites dataset (2016/4/1現在)によると、研究代表者らの研究は、化学、材料科学、物理、生物学および生化学、臨床医学、工学など多岐の学術分野にわたって引用されている。このことから、関連領域のみではなく、広い学術分野において、本成果が活用されていることが伺える。地域的にみると、本研究の引用は日本、アメリカ、欧州、アジアなどに分布し、世界に広がっていることが伺える。

◎ Elsevier社の研究分析ツールSciValによると、特別推進研究が行っている2008年から、研究代表者らの研究は継続的に毎年世界レベルのResearch Competency（強み領域）として上げられている。この結果から、研究代表者らが解明した「犠牲結合による高靱性原理」と多様な犠牲結合によるフトマテリアルの創製が、世界的に一つの潮流を作り出していることが伺える。

◎ 研究代表者は2014年に、大きな国際賞「The DSM Materials Sciences Award」を受賞した。この賞はDSM社と国際純正・応用化学連合（IUPAC, International Union of Pure and Applied Chemistry）と共同で設けている賞で、独創的・革新的な研究を通して材料科学の推進に寄与している研究者に対して、2年毎に一名に授与されるものである。研究代表者は、欧米以外の研究者として初めての受賞。

◎ 研究分担者や大学院生が国際・国内学会で多くの発表賞を受賞している。

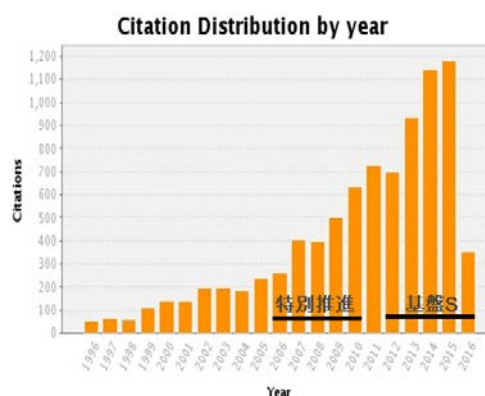


図1 論文の被引用数の年度推移
(Web of Science 2016年4月20日現在)

Journal	Impact factor	Citation times
Nature	41.456	3
Nature Materials	36.503	3
Nature Communications	11.47	6
Science	33.611	3
Progress in Polymer Science	26.932	2
Advanced Materials	17.493	19
Advanced Functional Materials	11.805	6
Angewandte Chemie	11.261	3
JACS	12.113	7

表1 高インパクトファクターの学術誌による被引用数 (Web of Science 2011年4月～2016年3月28日現在)

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

【研究期間中に発表した論文】

No	論文名・著者名・発行年・ページ数等	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	J.P. Gong Why are Double Network Hydrogels So Tough? Soft Matter, 6, 2583-2590, 2010	ゲルの破壊現象を研究し、ダブルネットワークゲルの高靱性化は、「ゲル内部に含まれる壊れやすい構造によるもの」を見出した。さらに、ダブルネットワークゲルの原理は化学種に依存しない普遍性があることを予測し、これを「犠牲結合による高靱性原理」という普遍的な概念へ拡張・発展させ、ゲル以外の材料設計にも適用する一般原理として確立した。	267
2	R.E. Webber, C. Creton, H.R. Brown, J.P. Gong Large Strain Hysteresis and Mullins Effect of Tough Double-Network Hydrogels Macromolecules, 40, 2919-2927, 2007	ダブルネットワークゲルが力学的ヒステリシスを示すことを発見し、それが高靱性化にとって重要であることを発見した。	171
3	T. Nakajima, H. Furukawa, Y. Tanaka, T. Kurokawa, Y. Osada, J.P. Gong True Chemical Structure of Double Network Hydrogels Macromolecules, 42, 2184-2189, 2009	ダブルネットワークゲルの強靱化には、第2網目が必ず化学架橋されている必要があることを解明し、脆い網目の内部破壊が生じる構造的な要因を解き明かした。	96
4	Y.-H. Na, Y. Tanaka, Y. Kawauchi, H. Furukawa, T. Sumiyoshi, J.P. Gong, Y. Osada Necking Phenomenon of Double-Network Gel Macromolecules, 39(14), 4641-4645, 2006	ダブルネットワークゲルがネッキング現象を示すことを初めて見出した。本現象が不可逆であり、弾性率の低下を伴うことから、ネッキングは脆い網目の内部破壊によって生じることを提唱した。	89
5	M. Huang, H. Furukawa, Y. Tanaka, T. Nakajima, Y. Osada, J.P. Gong Importance of Entanglement between First and Second Components in High-Strength Double Network Gels Macromolecules, 40, 6658-6664, 2007	動的光散乱測定により、ダブルネットワークゲル内部の2種の網目が非常に良く絡み合っていることが示唆された。この絡み合いは、脆い網目の内部破壊現象に重要な役割を示すと考えられる。	77
6	C. Azuma, K. Yasuda, Y. Tanabe, H. Taniguro, F. Kanaya, A. Nakayama, Y.M. Chen, J. P. Gong, Y. Osada Biodegradation of High-Toughness Double Network Hydrogels as Potential Materials for Artificial Cartilage Journal of Biomedical Materials Research Part A, 81A, 373-380, 2007	ダブルネットワークゲルの生体内での分解挙動について検討した。ある種のダブルネットワークゲルは長期間体内に埋入しても劣化しないことが分かった。	73
7	Q.M. Yu, Y. Tanaka, H. Furukawa, T. Kurokawa, J.P. Gong Direct Observation of Damage Zone around Crack Tips in Double-Network Gels Macromolecules, 42, 3852-3855, 2009	ダブルネットワークゲルに亀裂が進む時に生じるとされてきた亀裂近傍のダメージゾーンの可視化に初めて成功し、ダブルネットワークゲルの破壊エネルギー増大仮説を実証した。	58
8	W. Yang, H. Furukawa, J.P. Gong Highly Extensible Double-Network Gels with Self-Assembling Anisotropic Structure Advanced Materials, 20, 4499-4503, 2008	液晶性高分子電解質であるPBDT水溶液にカルシウムイオンを一方向から透析し、異方的にゲル化させた。本ゲルを用いて合成したダブルネットワークゲルは強靱かつ異方性を有することが見出された。	56
9	M.A. Haque, G. Kamita, T. Kurokawa, K. Tsujii, J.P. Gong Unidirectional Alignment of Lamellar Bilayer in Hydrogel: One-Dimensional Swelling, Anisotropic Modulus, and Stress/Strain Tunable Structural Color Advanced Materials, 22, 5110-5114, 2010	ゲル内部に配向したラメラ二分子膜を導入することにより、鮮やかな構造色を示すPDGI/PAAmゲルを得た。本ゲルは、一方向膨潤、力学刺激による色変化などのラメラ構造に由来する機能を示した。	52
10	K. Yasuda, N. Kitamura, J.P. Gong, K. Arakaki, H.J. Kwon, S. Onodera, Y.M. Chen, T. Kurokawa, F. Kanaya, Y. Ohmiya, Y. Osada A Novel Double-Network Hydrogel Induces Spontaneous Articular Cartilage Regeneration in vivo in a Large Osteochondral Defect Macromolecular Bioscience, 9, 307-316, 2009	軟骨欠損部位に埋入したダブルネットワークゲルが生体内で軟骨再生を誘導することを見出し、「軟骨は体内で再生しない」という定説を覆した。本論文は、ダブルネットワークゲルの再生医療応用への道を拓いた画期的なものである。	51

【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	T.L. Sun, T. Kurokawa, S. Kuroda, A.B. Ihsan, T. Akasaki, K. Sato, M.A. Haque, T. Nakajima, J.P. Gong Physical Hydrogels Composed of Polyampholytes Demonstrate High Toughness and Viscoelasticity Nature Materials, 12, 932-937, 2013	ゲルに可逆的な犠牲結合を導入し、高靱性と自己修復性を併せ持つゲルを世界で初めて創成した。このゲルは、生体適合性も合わせ持ち、医療・衛生材料としてのハイドロゲルの選択肢を大幅に増加させた。	118
2	M.A. Haque, T. Kurokawa, J.P. Gong Super Tough Double Network Hydrogels And Their Application As Biomaterials Polymer, 53, 1805-1822, 2012	ダブルネットワークゲルの驚異的な力学物性と、その医療応用への可能性を解説した総説である。	88
3	M.A. Haque, T. Kurokawa, G. Kamita, J.P. Gong Lamellar Bilayers as Reversible Sacrificial Bonds To Toughen Hydrogel: Hysteresis, Self-Recovery, Fatigue Resistance, and Crack Blunting Macromolecules, 44, 8916-8924, 2011	ラメラ層を導入した PDGI/PAAm ゲルが力学的に極めて強靱であることを明らかにした。例えば、引裂試験において亀裂が全く進展しなかった。この強靱性は、ラメラ層が脆い犠牲結合として働くことによることを提唱した。	59
4	J. Hu, T. Kurokawa, T. Nakajima, T.L. Sun, T.C. Suekama, Z.L. Wu, S.M. Liang, J.P. Gong High Fracture Efficiency and Stress Concentration Phenomenon for Microgel-Reinforced Hydrogels Based on Double-Network Principle Macromolecules, 45, 9445-9451, 2012	中性ゲルに強電解質ゲル微粒子を添加したゲルにおいて、ダブルネットワークゲルに類似の強靱化が起こること、またその高効率な破壊メカニズムを報告した。	58
5	T. Nakajima, T. Kurokawa, S. Ahmed, W. Wu, J.P. Gong Characterization of Internal Fracture Process of Double Network Hydrogels under Uniaxial Elongation Soft Matter, 9, 1955-1966, 2013	ダブルネットワークゲルの延伸時における脆い網目の内部破壊プロセスを詳細に検討した。10%もの高分子鎖が破壊されるという破壊の高効率性、破壊の不均一性、異方性などを報告した。	38
6	T. Nakajima, H. Sato, Y. Zhao, S. Kawahara, T. Kurokawa, K. Sugahara, J.P. Gong A Universal Molecular Stent Method to Toughen any Hydrogels Based on Double Network Concept Advanced Functional Materials, 22, 4426-4432, 2012	ゲルの膨潤度と脆さを任意に制御できる「分子ステント法」を開発した。これにより、理屈上あらゆる親水性ポリマーからダブルネットワークゲルが合成可能となり、ゲル応用の幅を大きく広げた。	31
7	Z.L. Wu, J.P. Gong Hydrogels with Self-Assembling Ordered Structures and their Functions NPG Asia Materials, 3, 57-64, 2011	ゲル内部で液晶性高分子を自己組織化させることにより、異方的構造、物性、機能が発現することを解説した総説である。	30
8	T.C. Suekama, J. Hu, T. Kurokawa, J.P. Gong, S.H. Gehrke Tuning Mechanical Properties of Chondroitin Sulfate-Based Double-Network Hydrogels Macromolecular Symposia, Special Issue: Polymer Gels: Formation, Structure, Properties and Applications, 329, 9-18, 2013	コンドロイチン硫酸をベースとしたダブルネットワークゲルについて、その組成と力学物性との関係を明らかにした。	29
9	H. Yin, T. Akasaki, T.L. Sun, T. Nakajima, T. Kurokawa, T. Nonoyama, T. Taira, Y. Saruwatari, J.P. Gong Double Network Hydrogels from Polyzwitterions: High Mechanical Strength and Excellent Anti-biofouling Properties Journal of Materials Chemistry B, 1, 3685-3693, 2013	分子内に+と-を併せ持ち、生体適合性が高い両性イオン性高分子からなるダブルネットワークゲルを創製した。本ゲルは、従来の DN ゲルに匹敵する強靱性を有しつつ、血小板やマクロファージが極めて付着しにくいという低免疫反応性を示した。	28
10	M.A. Haque, T. Kurokawa, G. Kamita, Y. Yue, J.P. Gong Rapid and Reversible Tuning of Structural Color of a Hydrogel over the Entire Visible Spectrum by Mechanical Stimulation Chemistry of Materials, 23, 5200-5207, 2011	PDGI/PAAm ゲルをダブルネットワーク化することにより、PDGI ラメラ層を分断することに成功した。これによって PDGI 粘性抵抗の影響を排除し、ゲルの変形による色変化の超高速化を達成した。	27

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

研究代表者らの「犠牲結合によるソフトマテリアルの高靱性原理」はすでに高分子材料科学分野に浸透しはじめ、多くの新しい高靱性ソフトマテリアルがこの原理に基づき、創製されている。また、この「犠牲結合による高靱性化原理」は、ゴム、プラスチック等の固体材料にも応用可能な新規指導原理となるため、企業現場の新たな材料イノベーションをもたらす可能性があり、産業界も分子設計の指針として、使われ始めている。

研究成果の社会還元として、以下のことも挙げられる。

◎ 関節治療への応用展開

人工関節などの医療・福祉用人工臓器の開発は超高齢化社会において重要課題である。本研究による生体軟組織のような新素材の創出は、今後の福祉社会の実現に不可欠である。研究代表者らが、北大医学研究科の安田和則教授のグループと共に、優れた力学物性と生化学物性を併せ持つ擬似生体組織ゲルを創製し、人工軟骨や軟骨再生誘導へ応用する研究を行っている。本研究で創製した擬似生体組織ゲルは関節治療に限らず、将来的に人工筋肉や人工心臓など他の生体代替組織として、さらに様々な生体組織の再生誘導の基材としての応用も期待でき、先端医療を支える新しい素材となる。

◎ 内閣府主導の国家プロジェクト ImPACT への参画

JST 革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)「超薄膜化・強靱化「しなやかなタフポリマー」の実現」(PM:伊藤耕三)のコアメンバーとして参画している。この ImPACT プログラムの目的は、しなやか性と破格的な高靱性を両立する高分子材料を開発し、安全・安心・低環境負荷という社会的ニーズに貢献する次世代自動車や輸送機器の実現に資することである。基盤 S 研究で確立した「犠牲結合によるソフトマテリアルの高靱性化」原理は、この「しなやかなタフポリマー」の実現にも有用であり、実際に企業の研究者らによって、革新的な材料開発のための設計指針とされている。

◎ 企業との共同研究

特別推進研究と基盤 S 研究で得られた新原理や新材料は企業から高く注目され、沢山の引き合いがあり、うち 14 件が共同研究に至った。現在も企業との共同研究を進め、研究成果が製品開発につながるような取り組みを精力的に行っている。また、特許などの産業財産権も積極的に取得し、広く利用してもらうことに努めている。

◎ 研究成果の社会・国民発信

学会での研究発表、原著論文の投稿、総説の執筆などによって研究成果を発信する他、ホームページで積極的に社会・国民に発信している。2006 年以降、プレスリリース 5 回、新聞記事等の報道 11 回。

◎ アウトリーチ活動

市民向けの公開講座や体験教室への積極的な参加と発表、小学校・中学校・高校での出前実験や科学キャラバン、博物館、科学館での研究成果の展示、アメリカ科学振興協会による博覧会における展示などを積極的に行っている。

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）

1. 北海道大学 創成研究機構 特任助教 → 現在 北海道大学 准教授
2. 北海道大学大学院博士後期課程 → 現在 北海道大学 助教
3. 北海道大学大学院博士後期課程 → 現在 University of Dhaka 助教
4. 北海道大学大学院博士後期課程 → 現在 Eulji University 助教
5. 北海道大学 博士研究員 → 現在 Xi'an Jiaotong University 教授
6. 北海道大学 博士研究員 → 現在 東京農工大学 助教
7. 北海道大学 博士研究員 → 現在 State University of Padang 講師
8. 北海道大学大学院博士後期課程 → 現在 埼玉大学 助教
9. 北海道大学 博士研究員 → 現在 旭川医科大学 助教
10. 北海道大学大学院博士後期課程 → 現在 Zhejiang University 准教授
11. 北海道大学 准教授 → 現在 山形大学 教授
12. 北海道大学 特任准教授 → 現在 横浜国立大学 准教授