

氏名	小 菅 祥 平
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博理工甲 第28号
学位授与の日付	2021年3月27日
学位授与の要件	学位規則(昭和28年4月1日文部省令第9号) 第4条第1項該当
学位論文題目	透明なグラフェンアンテナの研究
論文審査委員	主 査 教 授 黄 晋 二 副 査 教 授 橋 本 修 副 査 准教授 石 河 泰 明 副 査 東京都市大学大学院総合理工学研究科准教授 平 野 拓 一

論 文 の 内 容 の 要 旨

小 菅 祥 平

本研究では2次元シート炭素材料グラフェンを電極材料とする透明アンテナの研究に取り組んだ。

透明アンテナとは電極材料を透明導電膜とするアンテナであり、周囲の外観を損ねることなく様々な場所や物へ設置ができる。例えば、建物の窓ガラスや車のフロントガラスといった透明性の要求が高く、従来の金属製アンテナでは設置が難しい場所への設置も可能である。多様化及び高速化していく今後の無線通信において通信エリアのカバレッジを確保するべくアンテナの数が増えると予想されており、設置場所の自由度が高い透明アンテナの活用が注目されている。最近では学術的な研究にとどまらず、実用化に向けた試験運用が開始されており、5Gやそれ以降の無線通信を支える基盤技術の1つとして透明アンテナの使用が検討されはじめている。透明アンテナの電極材料としてITO(indium tin oxide)や他の酸化物系薄膜、微細金属メッシュなど様々な透明導電膜を用いたものが報告されている。

本研究では透明アンテナの電極材料としてグラフェンに着目した。厚さわずか原子1層のグラフェンは高いキャリア移動度、高い可視光透過率、フレキシブル性といっ

た特異な物性を有する炭素材料であり、次世代の透明導電膜材料の1つとして近年注目されている。まず化学気相成長（CVD: chemical vapor deposition）法で作製した厚さ1原子層のグラフェンを電極材料とするダイポールアンテナの作製に取り組んだ。作製したグラフェンダイポールアンテナからのマイクロ波電力の放射を実証した後、その放射特性を評価した。そのなかでグラフェンアンテナへの給電構造の最適化と、グラフェンのシート抵抗を下げるのが課題として抽出された。まずグラフェン/金属間のコンタクト特性をマイクロ波帯において評価し、グラフェンアンテナへ効率よく給電するための給電線構造の設計指針を得た。次にグラフェンの乱層積層とキャリアドーピングを行い、シート抵抗 $80 \Omega/\text{sq}$ かつ可視光透過率90%以上の膜を作製することに成功した。最後に、積層グラフェン膜を電極材料とした接地板付きモノポールアンテナを作製し、アンテナ特性を評価した。以上の結果から、実用的な透明アンテナの電極材料としてグラフェンを活用できる可能性を示すことができた。

本論文は全7章で構成されている。以下、各章の概要を述べる。

第1章では、研究の背景と目的について述べた。グラフェンの特徴と透明アンテナの必要性を説明し、グラフェンを透明アンテナの電極材料に用いる意義を述べた。

第2章では、グラフェンを透明アンテナの電極材料としてみた時の物性を考察した。透明アンテナの電極材料では高導電率と高可視光透過率のバランスが重要である。一般的な透明導電膜の導電率と可視光透過率はトレードオフの関係にある一方で、グラフェンは高導電率と高可視光透過率が両立できる特徴がある。以上のことをグラフェンの電子物性と光学特性から考察した。

第3章では、単層CVDグラフェンを電極材料とするダイポールアンテナの作製と特性評価を行った。まず均一な単層グラフェンを熱CVD法でCu箔上に作製した。グラフェン表面にPMMA（polymethylmethacrylate）を支持材として塗布した後、下地のCu箔をエッチングし石英ガラス基板へ転写した。ラマン分光測定の実験を行ったところ、欠陥が少ない高品質な原子1層のグラフェンが転写されていることがわかった。次に転写グラフェンの表面にAuを約500 nm真空蒸着した。Au膜上へフォトリソグラフィを行い、パターン外のAuをエッチングすることでダイポールアンテナのパターンを作製した。この工程をもう一度繰り返すことでアンテナ上の

Auを除去し、単層CVDグラフェンを電極材料とするダイポールアンテナを作製した。作製したグラフェンダイポールアンテナにマイクロ波電力を給電し、電力放射の有無を検証した。その結果20 GHz付近でマイクロ波電力の放射が観測され、グラフェンを透明アンテナの電極材料として用いる可能性の一端を見出すことができた。

(学術雑誌 [1] [2])

第4章では、マイクロ波帯における金属/グラフェン界面のコンタクト特性を評価し、グラフェンアンテナにおける給電構造の最適化に向けた設計指針を得た。グラフェンへキャリアを注入するためには金属が用いられる。この金属とグラフェンとの界面にあるコンタクト抵抗によって、グラフェンへのキャリア注入が律速される。この特性は直流帯では広く研究されているが、マイクロ波帯においては深く議論されていない。本章では、マイクロ波帯におけるコンタクト特性の評価から、グラフェンアンテナへ効率よくキャリアを注入できる給電構造の設計指針を得ることを目的とした。構造の一部を単層CVDグラフェンとしたCPW (Coplanar waveguide) を作製し、その伝送特性1-15 GHzで測定した。次にホール測定とTLM (Transfer length method) で得た実測値を用いてCPWの等価回路モデルを作成した。等価回路モデルにおけるコンタクト成分の周波数特性を計算した結果、マイクロ波帯では並列容量成分を介したキャリア注入が支配的であり、直流帯に比べマイクロ波帯ではグラフェンへキャリアが注入されやすいことが明らかになった。以上のコンタクト特性の評価を通して、グラフェンアンテナの給電構造の設計指針を得ることができた。

(学術雑誌 [3])

第5章では、高透明性と高導電性を併せ持つグラフェン膜を作製した。グラフェンは他の透明導電膜と違い、導電率を上げるためにキャリア密度を増加させても、その高い可視光透過率が維持できることが第2章で予想された。またグラフェン層数を増やすことで、膜全体のシート抵抗を下げるができる。本章では実際にグラフェンの積層とキャリアドーピングを行い、その電気特性と透過率を評価した。まずCu箔上に作製した単層CVDグラフェン上にPMMAを支持材として塗布した後、下地のCu箔をエッチングした。その膜を別途用意したPMMAが塗布されていないCu箔上のグラフェン上に転写した。この工程をもう一度行うことで、単層CVDグラフェンが3層積層された膜を作製した。3層積層グラフェンを石英ガラス基板上に転写し

た後、真空蒸着とフォトリソグラフィを行い、ホール測定用のホールバーデバイスを作製した。次に3層積層グラフェン膜上へイオン液体である TFSA (bis (trifluoromethanesulfonyl) amine) を塗布しキャリアドーピングを行った。3層積層グラフェン膜のホール測定を行ったところ、シート抵抗は $80 \text{ } \Omega/\text{sq}$ であり単層 CVD グラフェンの値 ($750 \text{ } \Omega/\text{sq}$) に比べ約90% 低いシート抵抗値であった。またキャリアドーピング前後の可視光透過率は波長550 nm においてそれぞれ90.4% と90.1% であり、キャリアドーピングを行った後も高い可視光透過率が維持されていることがわかった。加えて Pauli blocking による透明領域を近赤外領域において観測し、グラフェン膜のさらなる透明化の可能性を見出した。

第6章では、第5章で作製した高可視光透過率 (90%) と低シート抵抗 ($80 \text{ } \Omega/\text{sq}$) を併せ持つグラフェン膜を電極材料とした接地板付きモノポールアンテナを作製し、そのアンテナ特性を評価した。第4章で得られた知見を活かし、給電端の金属/グラフェン幅を大きくした。接地板付きの構造では、給電系の影響を含まないアンテナエレメントのみの特性を評価することができる。グラフェンアンテナエレメントの入力インピーダンスを測定したところ、グラフェンモノポールアンテナの共振周波数は9.8 GHz であった。グラフェンアンテナエレメントの放射効率を Wheeler cap 法によって測定したところ、共振周波数における放射効率は52.5% であることがわかった。この値は先行研究で報告されている単層 CVD グラフェンの放射効率 (20.7%) に比べ高い値であった。遠方界における放射パターンは同形状の金属アンテナとほとんど同じであり、グラフェン膜が金属の様に振舞っていることがわかった。またグラフェンモノポールアンテナの利得の時間経過による変化を観察したところ、時間経過に伴う利得の劣化はほとんど無かった。以上、本研究ではグラフェンの実用的な透明アンテナの電極材料としての可能性を示した。

第7章では、本研究の総括と結論を述べた。

発表論文

本研究に関する論文

【学術雑誌】

(査読のあるもの)

1. Shohei Kosuga, Ryosuke Suga, Osamu Hashimoto, and Shinji Koh, "Graphene-based optically transparent antenna" , Appl. Phys. Lett. **110**, 233102 (2017) .
2. Shohei Kosuga, Keisuke Suga, Ryosuke Suga, Takeshi Watanabe, Osamu Hashimoto, and Shinji Koh "Radiation properties of graphene-based optically transparent dipole antenna" Microw. Technol. Lett. **60**, 2992-2998 (2018) .
3. Shohei Kosuga, Ryosuke Suga, Takeshi Watanabe, Osamu Hashimoto, and Shinji Koh " Characterization of contact properties at interface between metal and graphene up to 15 GHz" Eng. Rep. preprint, DOI: 10.1002/eng2.12325, accepted (October 16, 2020) .

【学会発表（国際、口頭発表）】

(査読のあるもの)

1. ○S. Kosuga, R. Suga, O. Hashimoto, and S. Koh "Microwave Radiation from Graphene-Based Optically Transparent Antenna", Progress In Electromagnetics Research Symposium, Singapore (November 22, 2017) .
2. ○Shohei Kosuga, Keisuke Suga, Yuki Abe, Ryosuke Suga, Takeshi Watanabe, Osamu Hashimoto, and Shinji Koh "Optically transparent dipole antenna based on CVD monolayer graphene", International SmartCity Symposium, Malaysia (October 16, 2018) .
3. ○Shohei Kosuga, Keisuke Suga, Ryosuke Suga, Takeshi Watanabe, Osamu Hashimoto, and Shinji Koh "Radiation Characteristics of Optically Transparent Dipole Antenna Fabricated using CVD Monolayer Graphene", Asia-Pacific Microwave Conference, Kyoto (November 7, 2018) .

【学会発表（国際、ポスター発表）】

(査読のあるもの)

1. ○Shohei Kosuga, Ryosuke Suga, Takeshi Watanabe, Osamu Hashimoto, and Shinji Koh "Contact Characteristics at the Interface between Metal and Graphene Up to 30 GHz," Smart City Symposium 2019, Chennai, India, (October 31, 2019) .

【学会発表（和文、口頭発表）】

(査読のないもの)

1. ○小菅祥平, 須賀良介, 橋本修, 黄晋二, "透明なグラフェンダイポールアンテナ" 第78回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 6p-C16-2 (2017) .
2. ○小菅祥平, 菅啓佑, 須賀良介, 橋本修, 黄晋二, "透明なグラフェンダイポールアンテナの放射特性評価" 第65回応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学, 18a-C202-1 (2018) .
3. ○小菅祥平, 須賀良介, 橋本修, 黄晋二, "マイクロ波帯における金属/グラフェンコンタクト特性" 第80回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 18a-E308-6 (2019) .

【学会発表（和文、ポスター発表）】

(査読のないもの)

1. ○小菅祥平, 須賀良介, 黄晋二, 橋本修 "グラフェン上に作製したコプレーナ導波路のマイクロ波帯における伝送特性の測定" 第63回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 20a-P4-51 (2016) .
2. ○小菅祥平, 菅啓介, 阿部優樹, 須賀良介, 渡辺剛志, 橋本修, 黄晋二 "透明なグラフェンモノポールアンテナの放射特性評価" 第79回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 18p-PB 3-44 (2018) .

【総説、解説、著書】

1. 小菅祥平 「透明なグラフェンアンテナ Invisible graphene antenna」, NEWS SOKEN vol. 19, 青山学院大学総合研究所, 2019年10月
2. 黄晋二, 小菅祥平, 須賀良介, 渡辺剛志, 橋本修 「CVD グラフェンを用いた透

明アンテナ」, Japan New Diamond Forum, 第35巻 第4号, pp24-25 (2019) .

【受賞】

1. Smart City Symposium 2019 best student poster
2. 2020年度 青山学院大学大学学業成績優秀者賞 最優秀賞

【研究費】

1. 2018年度 青山学院大学アーリーイーグル研究支援制度
2. 2019年度 青山学院大学アーリーイーグル研究支援制度
3. 2020年度 青山学院大学アーリーイーグル研究支援制度
4. 科研費 特別研究員奨励費

【奨学金】

1. 青山学院大学 薦田先端学術奨学金 奨学生 (2018年度 採用)
※学振特別研究員採用に伴い2019年度以降は辞退
2. 日本学生支援機構 第一種貸与奨学金 返還半額免除 (博士前期課程)
3. 日本学生支援機構 第一種貸与奨学金 返還半額免除 (博士後期課程)
4. 日本学術振興会 特別研究員 研究奨励金 (2019年4月～2021年3月)

【その他】

1. 学術論文誌 Applied Physics Letters Editor' s pick 選出
2. 第63回応用物理学会秋季学術講演会 分科企画シンポジウム枠選出
3. 黄晋二, 小菅祥平, 須賀良介, 橋本修, 「マイクロ波帯アンテナ」特願2017-198917
4. AGU News No.89 p5 「グラフェンを用いた透明アンテナ」
5. Nature index 2018 Japan 青山学院大学の日本ランキング5位に貢献
WFC (Weighted fractional count) 学内合計8.72中1.0の貢献度
6. イノベーションジャパン2018～大学見本市&ビジネスマッチング～
出展タイトル: 『原子1層のグラフェンを用いて作製した透明アンテナ』
会期: 2018年8月30～31日 会場: 東京ビッグサイト
7. エフエムさがみ 青山学院大学理工学部スポットCM 出演 (2018年)

8. CEATEC 2019

出展タイトル：『原子1層のグラフェンを用いて作製した透明アンテナ』

会期：2019年10月15~18日 会場：幕張メッセ E072-18

9. 化学工業日報 2019年12月2日「青山学院大学 透明アンテナ 単層グラフェンで開発」

その他の公表論文

【学術雑誌】

(査読のあるもの)

1. Shohei Kosuga, Shunichiro Nagata, Sho Kuromatsu, Ryosuke Suga, Takeshi Watanabe, Osamu Hashimoto, and Shinji Koh "Optically transparent antenna based on carrier-doped three-layer stacked graphene" , submitted.
2. T.Intaro, J.Hodaka, P.Suwanyangyaun, R.Botta, N.Nuntawong, M.Niki, S.Kosuga, T.Watanabe, S.Koh, T.Taychatanapat, S.Sanorpim "Characterization of graphene grown by direct-liquid-injection chemical vapor deposition with cyclohexane precursor in N₂ ambient," Diamond and Related Materials, **114**, 107717, (2020) .

【学会発表】

(査読のあるもの)

1. ○Kunpot Mopoung, Pattana Suwanyangyaun, Reiji Odanaka, Shohei Kosuga, Takeshi Watanabe, Shinji Koh, and Sakuntam Sanorpim, "A Real-Time Free Chlorine Monitoring by Graphene Field-Effect Transistor (GFET) ," The 14th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2019) FrC2.1, Bangkok, Thailand, April 12 (2019) .
2. ○T. Intaro, T. Taychatanapat, R. Botta, N. Nuntawong, J. Hodak, M. Niki, S. Kosuga, T. Watanabe, S. Koh, and S. Sanorpim, "Graphene Growth on Cu Foil by Direct-Liquid-Injection Chemical Vapor Deposition with Cyclohexane Precursor in N₂ Ambient,"Graphene Korea 2019, Seoul, Republic of Korea, March 27th (2019) .

3. ○N. Hara, T. Watanabe, T. Iwasaki, S. Kosuga and S. Koh, "Comparison between Mono- and Multi-Layer CVD-Grown Graphene Transparent Electrodes for Electrochemiluminescence Applications," 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2019) , 31P-9-7, hiroshima, Japan, Oct 31 (2019) .

(査読のないもの)

1. ○渡辺剛志、上原透、小田中玲志、小菅祥平、黄晋二「CVD グラフェンを利用した遊離塩素測定」日本機能水学会第17回学術大会、高岡市生涯学習センター、2018年11月17日
2. ○仲條康太、渡辺剛志、小菅祥平、黄晋二、"グラフェン電界効果トランジスタを用いた溶液ゲート型遊離塩素センサにおけるゲート電極の影響" 第80回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、21a-PB1-44 (2019)
3. ○原菜摘、渡辺剛志、岩崎貴充 小菅祥平、黄晋二、"CVD グラフェン透明電極における表面の特性と電気化学発光特性の相関" 第80回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、21a-PB1-47 (2019)
4. ○黒松将、小菅祥平、渡辺剛志、野々口斐之、黄晋二「透明アンテナ作製に向けたカーボンナノチューブインクを用いた透明導電膜の作製」第67回応用物理学会春季学術講演会、12a-PA2-14、上智大学、2020年3月12日
5. ○黒松将、小菅祥平、渡辺剛志、野々口斐之、黄晋二「カーボンナノチューブ導電膜の転写技術の確立」第81回応用物理学会秋季学術講演会（オンライン）、11p-Z28-12, 2020年9月11日

審査の結果の要旨

本論文は、ナノ炭素材料であるグラフェンを透明アンテナの電極材料として活用する技術に関する研究成果をまとめたものである。グラフェンは高いキャリア移動度、1層につき97.7%という高い可視光透過率、優れたフレキシブル性といった特異な物性を有する2次元シート炭素材料であり、そのデバイス応用に関する精力的な研究が世界中で進められている。また、透明導電膜を用いた透明アンテナ技術も近年大いに注目されている。透明アンテナは、周囲の外観を損ねることなく、様々な場所や物へ設置が可能であるという付加価値を持つ。多様化・高速化する今後の無線通信技術に

において、通信エリアのカバレッジを確保するために必要となるアンテナ数が増えることが予想されているが、設置場所の自由度が高い透明アンテナは、建物の窓ガラスや車のフロントガラスといった、従来の金属製アンテナでは設置が困難な場所への設置も可能となる。透明アンテナの電極材料にはITO等の酸化物系薄膜、金属微細メッシュ等、様々な透明導電膜を用いた研究例が報告されており、最近では学術的な研究にとどまらず実用化に向けた試験運用が着手され、5Gやそれ以降の無線通信を支える技術の一つとして検討されはじめている。

このような背景をふまえて本論文では、透明アンテナの電極材料としてグラフェンを提案している。グラフェンが持つ様々な特異な物性によって、既存の透明導電膜では実現できない透明アンテナを作製できる可能性があると考え、これを実験的、理論的に追求したものである。特に、透明アンテナの産業応用に向け、大面積かつ高品質なグラフェン膜を成膜できる化学気相成長法（CVD：chemical vapor deposition）に着目した。本論文では、実際にCVDグラフェンを用いた透明アンテナを作製し、その特性評価を通してグラフェン透明アンテナ技術における様々な課題を抽出し、それらを解決するための技術の提案とその確立に取り組んだ。グラフェン透明アンテナ技術は、グラフェン等のナノカーボン材料を扱う材料工学とアンテナ技術を扱う電波工学という二つの学問領域にわたる融合研究にあたり、世界的に見ても類似の研究報告例は極めて少ない。そのような難しい融合研究において、本論文では、グラフェン透明アンテナを実現するための様々な技術の提案・確立を進め、既存の透明導電膜には無いグラフェンだけが持つ特異な可能性を見出し、現時点でのグラフェン透明アンテナの実用化に対する位置づけを明確にした。

以上のように、本論文ではグラフェンを用いた透明アンテナ技術に関するものであり、以下の全7章から構成される。

第1章「序論」では研究の背景と目的について述べている。グラフェンの特徴と透明アンテナについて説明し、グラフェン透明アンテナを開発する意義を述べている。

第2章「グラフェン：透明アンテナの電極材料」では、透明アンテナの電極材料という観点で重要となるグラフェンの物性について考察した。透明アンテナの電極材料では、高い導電率と高い可視光透過率を両立することが重要であり、一般的には、透明導電膜の導電率と可視光透過率はトレードオフの関係にあるが、グラフェンは、高導電率と高可視光透過率を両立できるという極めて特殊な可能性を持つことを示した。

第3章「単層CVDグラフェンを電極材料とするダイポールアンテナ」では、原子

1層のCVDグラフェンを電極材料とするダイポールアンテナの作製と特性評価について述べている。ここでは、グラフェンのCVDと転写技術、およびアンテナ作製プロセス技術について述べているが、このグラフェン透明アンテナの作製技術は、本研究の基盤をなす重要な技術の確立にあたると言える。作製したダイポールアンテナからのマイクロ波電力の放射を20 GHz付近で観測したが、この結果は、単層CVDグラフェンを用いた透明アンテナの動作を世界で初めて実験的に実証したものであり、本研究の第一歩として極めて重要な結果であると言える。さらに放射パターン、利得、近傍界特性、送受信特性を測定し、得られた結果を用いた電磁界シミュレーションを通して、実用的なグラフェン透明アンテナを実現するために必要となる様々な課題を抽出している。

第4章「マイクロ波帯における金属／グラフェンコンタクト特性」では、第3章において課題として抽出された、マイクロ波帯における金属／グラフェン界面におけるコンタクト特性について述べている。直流電流での金属／グラフェン界面を通じたキャリア注入では、グラフェンの低い状態密度に起因する大きなコンタクト抵抗によってキャリア注入が律速されることが知られている。この金属／グラフェンのコンタクト特性については、直流帯では広く研究されているものの、マイクロ波帯においては深く議論されていない。本論文では、単層CVDグラフェン領域を含むCPW (Coplanar waveguide) を作製し、マイクロ波帯における伝送特性を実験的に測定した。併せて、Hall効果測定とTLM法を行い、CVDグラフェンの導電性についての実測値を得ている。最後に、これらの実験値とCPWの等価回路モデルを組み合わせたシミュレーションを行い、コンタクト成分の周波数特性を算出している。結果的に、マイクロ波帯では容量成分を介したキャリア注入が支配的になることから、直流帯よりもキャリア注入しやすいことを明らかにした。本章でのコンタクト特性解析を通して、グラフェンアンテナの給電構造設計における最適化の指針を得ることができている。

第5章「高可視光透過率と高導電率を併せ持つグラフェン膜の作製」では、高透明性と高導電性を併せ持つグラフェン膜の作製技術について述べている。ここでは、第3章で抽出された課題の一つである“グラフェンの低抵抗化”に対して、グラフェンの積層化とキャリアドーピング技術を組み合わせて取り組むとともに、第2章で指摘した、グラフェンではキャリア密度の増加に伴う可視光透過率の低下が生じないことを実験的に実証している。実際に、キャリアドーピングを施した3層積層CVDグラフェン膜についてHall測定と透過率測定を行い、単層CVDグラフェンにおいて750

$\Omega/\text{sq.}$ であったシート抵抗を $80 \Omega/\text{sq.}$ まで低減し、かつ、90%以上の高い光学的透過率を維持できることを示した。併せて、Pauli blockingによる吸収の消失（透明化）を近赤外領域において観測することに成功し、低抵抗化に向けたさらなるキャリア密度増大が、可視光領域における透明化につながる可能性も示している。

第6章「高可視光透過率と高導電率を併せ持つグラフェン膜を電極材料とする接地板付きモノポールアンテナ」では、第5章で作製した、低抵抗かつ高可視光透過率を持つグラフェン膜を用いたモノポールアンテナの作製と評価について述べている。ここでは、アンテナ特性を正確に評価するために接地板付きモノポールアンテナ構造を採用し、第4章で得られたコンタクト特性の最適化指針を活用して給電構造を設計した。作製したアンテナの特性評価を通して、グラフェンを低抵抗化したことによって金属電極に近い特性に近づいたことを示した。最後に、Wheeler cap法を用いて放射効率を評価し、52.5%という値を得ているが、グラフェンを用いた透明アンテナの放射効率に関する報告はこれまでに無く、実用化に対して現時点のグラフェン透明アンテナがどのような位置づけにあるかを示す重要なデータを得た、とすることができ、グラフェン透明アンテナの実用可能性を実験的に実証した。

第7章「総括」では、本研究の総括と結論、および今後の展望について述べている。

以上のように、本論文でグラフェンを電極材料として活用する透明アンテナ技術に関して、ナノカーボン材料工学、および電波工学の二つの領域にわたる広範囲な内容がまとめられている。本研究は、単層CVDグラフェンを用いた透明アンテナの世界初の動作実証成功に端を発し、そこで抽出された課題を一つ一つ解決することでグラフェン透明アンテナの著しい特性向上を達成した。最終的には、グラフェン透明アンテナの実用の可能性をも示しており、関連する学術分野への多大な貢献、および産業へ大きなインパクトを持つものと確信する。なお、これらの研究成果は、計3本の査読付き欧文学術誌に掲載されているほか、国際学会、国内学会でも多数報告されており、国際的にも高く評価されている。以上から、審査員一同は、小菅祥平氏が博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。