

携帯電話の成人と子供の頭部を対象とした局所 SAR の比較

藤原 修^{†a)} 王 建青[†] 久田 智視[†] 渡辺 聡一^{††}
山中 幸雄^{††}Comparison of Local SAR in Realistic Head Models of Adult and Children
for Portable TelephonesOsamu FUJIWARA^{†a)}, Jianqing WANG[†], Tomomi HISADA[†], Souichi WATANABE^{††},
and Yukio YAMANAKA^{††}

あらまし 携帯電話による子供の頭部の局所ピーク SAR (Specific Absorption Rate) に関しては、成人頭部のそれとの大小関係において世界各国の研究グループで評価が異なり、論争が巻き起こっている。本論文では、日本人年齢別計測データをもとに、筆者らの開発した成人頭部数値モデルを縮小することで、児童に相当する 12 歳・10 歳・7 歳・5 歳と、幼児相当の 3 歳児の合計 5 種類の子供の頭部モデルを作成し、900 MHz 携帯電話による頭部内局所 SAR をアンテナの「垂直配置」と、実使用状態の「傾斜位置」並びに「傾斜の位置」に対して試算した。その結果、携帯電話の「垂直配置」では、局所ピーク SAR はいずれの年齢の子供の頭部モデルにおいても成人より増加する傾向がみられたが、実使用状態においては局所ピーク SAR の子供と成人との差異は小さく、子供のほうが成人よりも減少の傾向にあることがわかった。これらの子供対成人における局所ピーク SAR の大関係は、アンテナ入力インピーダンス実部の頭部モデルに対する変化からおおむね説明できることを示した。

キーワード 携帯電話, ドシメトリ, SAR, 成人, 子供, アンテナ入力インピーダンス

1. ま え が き

近年、携帯電話が爆発的に普及し、それに伴い携帯電話使用者の低年齢化が進んでいる。携帯電話の発する電波の健康影響に関しては、英国政府の委託を受けた研究グループから、人体に影響を及ぼす明確な科学的根拠はなかったとしながらも、子供への影響は否定できないとして、16 歳に達しない子供の携帯電話の不必要な使用は控えるべきとの報告書が発表された [1]。その理由は、子供は頭蓋骨が薄く、脳神経も発達過程にあるため、大人よりも電波の影響を受けやすいであろうとの仮定に基づく。携帯電話を対象とした人体防護の局所吸収指針では、人体頭部 1g または 10g 組織での平均局所ピーク SAR (比吸収率: 単位体重当たり吸

収される電力, 単位: W/kg) が評価量として用いられている。

さて、1996 年に Gandhi らは、磁気共鳴像 (MRI : Magnetic Resonance Imaging) データに基づく成人頭部の数値モデルを等比率で縮減・作成した小児モデルに対して頭部の局所 SAR を解析し、携帯電話による近傍電磁界は成人の場合よりも小児のほうが頭部内へ深く侵入することで 5 歳児の 1g 平均局所ピーク SAR は成人のそれより 50% も増加することを報告した [2]。一方、1998 年に Kuster らは、小児頭部の MRI データから数値モデルを作成し、携帯電話の代わりとした 0.45λ ダイポールアンテナで SAR を解析した結果、成人と小児のいずれの頭部モデル対しても SAR の空間分布は類似し、小児頭部での局所 SAR 値の著しい増加はないとしている [3]。2000 年、筆者らは、頭部解剖図をもとに手作り開発した日本人の成人頭部モデルを等比率で縮減した小児モデルに対して SAR を解析し、SAR 値は成人の場合よりも 50% も増加しなかったものの、Gandhi らと同じく小児のほうが高くなる結果を得た [4]。Gandhi らは

[†] 名古屋工業大学工学部電気情報工学科, 名古屋市
Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Nagoya-shi, 466-8555 Japan

^{††} 独立行政法人・通信総合研究所, 横須賀市
Communications Research Laboratory, Yokosuka-shi, 239-
0847 Japan

a) E-mail: fujiwara@odin.elcom.nitech.ac.jp

2002年の論文 [5] でも小児頭部は成人頭部よりも局所ピーク SAR は増加すると主張しているのに対して、2002年の BEMS (Bioelectromagnetics Society) 会議で Guy らは、Gandhi らの計算をフォローしたうえで Kuster らの結果 [3] を支持する論文 [6] を発表している。この種の問題に関しては、2001年9月に欧州の電磁波に関する共同研究プロジェクト COST281 において小児の頭部曝露に関する短期の研究プロジェクトが立ち上げられ、2002年9月までに結論をまとめているが、Kuster の中間報告 [8] によれば、局所ピーク SAR の差異の原因としては携帯電話の位置、アンテナ入力インピーダンス、頭部モデルの構成セルサイズがそれぞれ異なるためであり、頭部サイズや内部組織構造で著しく SAR が異なることの科学的根拠は弱いとしている。

筆者らの研究グループでは、さきに、成人・7歳児・3歳児の3種類の日本人頭部モデルを対象として、Gandhi らと Kuster らと同じ計算条件のもとで携帯電話による頭部内局所 SAR を計算し、両グループの結果が正しいこと、小児頭部内局所ピーク SAR の増減傾向はアンテナの種類や数値計算条件等に依存して異なること、などを報告した [9]。しかしながら、前述のいずれの論文でも解析に際しては携帯電話機やアンテナを頭部に対して垂直に配置しており、携帯電話機の実使用状態を必ずしも反映するものではない。

本論文では、成人と児童に相当する 12歳・10歳・7歳・5歳と、幼児相当の3歳の合計6種類の解剖学的頭部モデルを対象として、携帯電話の「垂直配置」に加え、適合性試験で定められた標準使用位置の「頬の位置」と「傾斜の位置」に対する局所 SAR を FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法で試算・比較し、成人と子供に対する頭部内の局所ピーク SAR の決定要因を考察する。

2. 頭部モデルの作成

図 1 (a) は 23歳の日本人男性の頭部 MRI (Magnetic Resonance Imaging) データに基づいて筆者らが開発した成人頭部モデルを示す。同モデルは 1辺 2mm の立方体セル約 53 万個から構成されており、皮膚、脂肪、筋肉、骨、軟骨、骨髄液、硬膜、脳髄液、灰白質、白質、硝子体、レンズ、角膜、鞏膜、耳下腺、血液、粘膜の 17 種類の組織からなる。図 1 (b) ~ (f) は、筆者らの開発になる子供の頭部モデルを示すが、これらは次のように構築した。子供の頭部モデルは、MRI デー

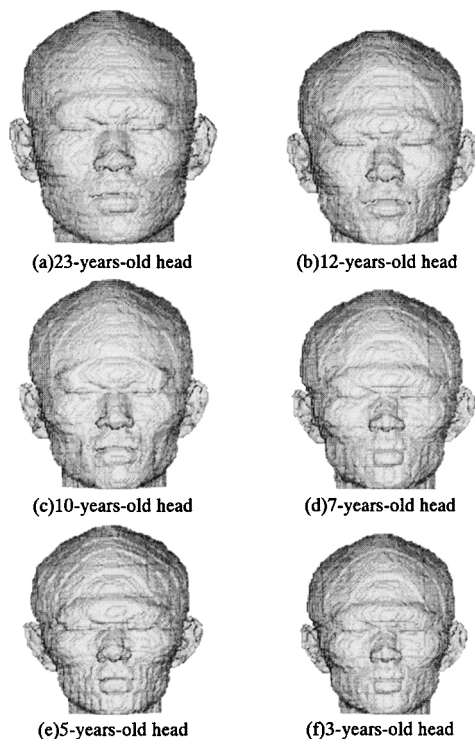


図 1 年齢別人体頭部モデル
Fig. 1 Head model for various ages.

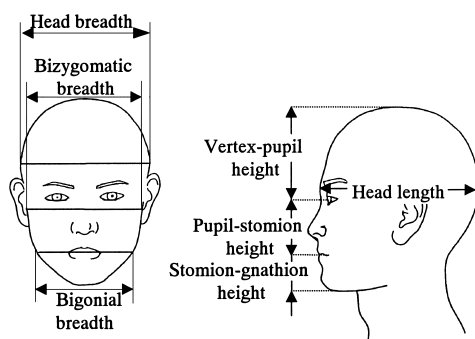


図 2 頭部の計測部位
Fig. 2 Measurement parts of head size.

タが入手困難であるため、日本人年齢別計測統計データ [10] を参考に成人頭部モデルを縮減して作成した。ただし、この統計データは 7 歳児以上を対象としているため、それ以下の年齢の小児頭部データについては外挿で求めた (後述) 。

図 2 は頭部の計測部位、図 3 は年齢に対する頭部計測部位の寸法をそれぞれ示す。なお、図 3 では「頭幅」、「頬弓幅」、「下顎角幅」、「頭長」、「口裂-オトガ

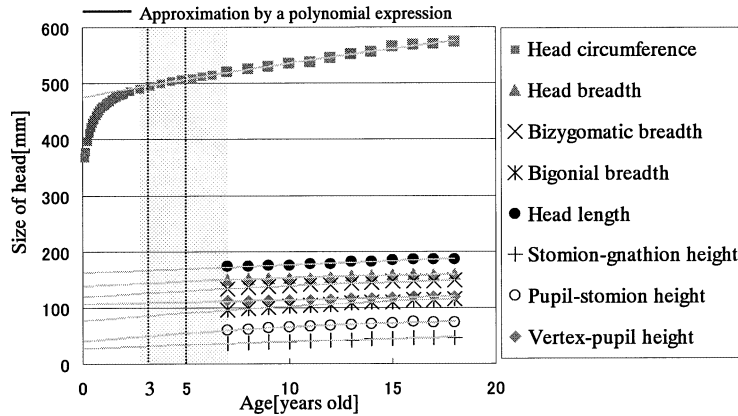


図 3 年齢に対する頭部計測部位の寸法
Fig. 3 Age versus the corresponding head sizes.

表 1 頭部寸法の年齢別計測値と縮減率

Table 1 Statistical data for various parts of head and reduction rates for various ages.

	23-years old[cm]	12-years old[cm]	10-years old[cm]	7-years old[cm]	5-years old[cm]	3-years old[cm]
Head length	18.8	17.8(95%)	17.5(93%)	17.3(92%)	16.9(90%)	16.6(88%)
Head breadth	16.0	15.4(96%)	15.3(96%)	14.9(93%)	14.6(91%)	14.3(89%)
Bizygomatic breadth	14.9	13.9(93%)	13.8(93%)	13.3(89%)	13.0(87%)	12.5(84%)
Bigonial breadth	11.6	10.5(91%)	10.2(88%)	9.5(82%)	9.0(78%)	8.4(72%)
Vertex-pupil height	11.5	11.4(99%)	11.3(98%)	11.1(97%)	11.0(96%)	10.9(95%)
Pupil-stomion height	7.5	6.8(91%)	6.6(88%)	6.0(80%)	5.4(72%)	4.8(64%)
Stomion-gnathion height	4.7	4.1(87%)	3.9(83%)	3.7(79%)	3.4(72%)	3.1(66%)

(): Reduction rate

イ高」,「瞳孔-口裂高」,「頭頂-瞳孔高」の7箇所における7~18歳の各部位の年齢別計測データをプロットし,これらのデータを二次の多項式で近似した曲線を実線で示している.ただし,図中の「頭囲」については文献[11]に0歳までのデータが存在したため,これらの計測データをすべてプロットしているが,近似曲線は,他の計測部位と同じく7~18歳のデータだけで求めているにもかかわらず,3~7歳までの年齢別計測値をよく表していることがわかる.それゆえに,5歳児・3歳児の「頭囲」以外の計測部位については,7~18歳のデータから求めた近似曲線の外挿値から求め,縮小頭部モデルを作成した.

表1は頭部寸法の年齢別計測値と縮減率を示す.なお,今回使用した縮減アルゴリズムは文献[12]のそれとほぼ同じであるが,皮膚表面の平滑度は向上している.また,頭部の奥行き方向に関しては図2にも示したように,頭長のデータしかなかったために,頭の上部は頭長の縮減率を使い,下部ではそれぞれ「頬弓幅」,「下顎角幅」に対応する縮減率を使用した.また,

縮減率の変わりめについては滑らかになるように縮減率を徐々に変化させた.このようにして得られた12歳・10歳・7歳・5歳・3歳の頭部モデルを図1(b)~(f)にまとめて示している.

3. 計算方法

上述した成人と子供の頭部モデルに対して,携帯電話による頭部内局所SARを計算した.図4は携帯電話機の配置を示す.頭部に対して携帯電話機を垂直に配置した「垂直配置」のほかに,標準使用位置として頬に近づける形で配置した「頬の位置」と頬から外へ離す形で配置した「傾斜の位置」を想定した.なお,携帯電話の標準使用位置としては,頭部モデルを60°前方向に回転し,更に携帯電話側に10°傾けて「頬の位置」を,または携帯電話とは反対側に5°傾けて「傾斜の位置」をそれぞれ実現した.ただし,子供に対する携帯電話機の配置に関しては標準測定法に定義されていないので,ここでは成人との対照・比較を容易にするために,成人の場合と同じ方法で「頬の位置」と

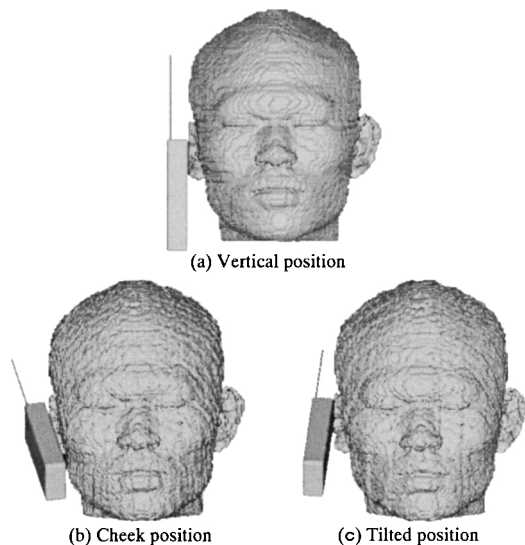


図 4 携帯電話の配置図
Fig. 4 Arrangement of portable telephone.

「傾斜の位置」を実現した。また、耳については携帯電話により押しつぶされた状態を想定するためにいずれのモデルも右耳を垂直に切り落とした後に回転した。携帯電話機は 110 mm × 20 mm × 40 mm の金属きょう体とその上部に配置された 1/4 波長モノポールアンテナで模擬し、周波数は 900 MHz とした。電話機本体上部から 10 mm 下の位置にスピーカがあるものとし、それが耳の中心にくるように配置した。ただし、頭部モデルの各組織の電気定数については、子供の頭部のデータが不十分であるため、成人のそれと同じとして文献 [13] から引用した。

FDTD 計算においては、アンテナを δ ギャップ給電法で励振し、吸収境界条件には 12 層の PML (Perfectly Matched Layer) を適用した。頭部内 1 g 及び 10 g 平均局所ピーク SAR は、それぞれ頭部内 $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ の立方体及び $2.2 \times 2.2 \times 2.2 \text{ cm}^3$ の立方体領域での平均 SAR の最大値から求めた。そのとき、各立方体で組織セルの占有率は必ず 90% 以上となるように設定した。

4. 計算結果と考察

図 5 は 1 g 平均局所ピーク SAR、図 6 は 10 g 平均局所ピーク SAR をそれぞれ示す。いずれも携帯電話のアンテナ出力電力を 0.27 W と一定にした。図 5 から、1 g 平均局所ピーク SAR については、「垂直配置」

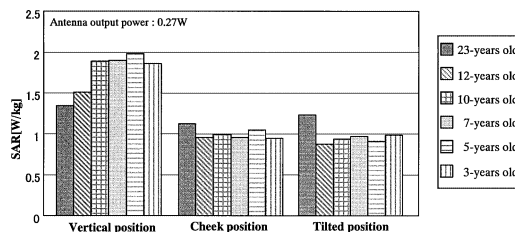


図 5 頭部内 1g 平均局所ピーク SAR
Fig. 5 1-gram averaged spatial peak SAR in the head.

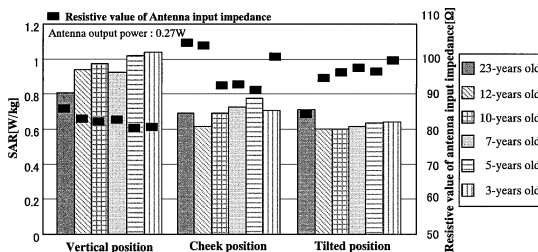


図 6 頭部内 10g 平均局所ピーク SAR
Fig. 6 10-gram averaged spatial peak SAR in the head.

の場合はいずれの子供の年齢においても成人より高い値を示しているが、年齢が低下するにつれて局所 SAR は必ずしも上昇しているとはいえないこと、このとき、5 歳児で局所ピーク SAR は最も高くなる傾向がみられ、成人と比べると 47.3% も上昇していること、などがわかる。一方、「頬の位置」と「傾斜の位置」では、子供は成人に比べて逆に低い値を示していることがわかる。10 g 平均局所ピーク SAR については、図 6 から、1 g 平均局所ピーク SAR と類似の傾向がみられること、「垂直配置」では子供は成人に比べて高くなっているのに対して「傾斜の位置」では逆に小さくなっていること、しかし「頬の位置」では一定の規則性はみられないこと、などがわかる。

次に、成人と子供に対する頭部内の局所ピーク SAR の相違をアンテナ入力インピーダンスの変化から考察した。一般に、10 g 平均局所ピーク SAR は、1 g 平均より耳の形状の影響を受けにくく、頭部内の局所吸収特性の特徴を把握しやすいので、頭部モデルに対するアンテナ入力インピーダンスの実部を 10 g 平均局所ピーク SAR と併せて図 6 に示す。この図から、アンテナ入力インピーダンスの実部は、「垂直配置」では成人対子供で小さくなっているのに対して、「傾斜の

位置」では逆に大きくなっていることがわかる。このことは、一定のアンテナ出力電力ではアンテナ入力インピーダンスの実部が減少/増加すればアンテナ実効電流が増加/減少するので、「垂直配置」では子供の頭部のピーク SAR が増加し、「傾斜の位置」では逆に減少することを示している。ただし、「頬の位置」ではアンテナ入力インピーダンスの実部と局所ピーク SAR とは必ずしも単純な増減関係にはないが、アンテナ入力インピーダンスの実部が最大となる成人では、局所ピーク SAR も低く、最小となる 5 歳児では局所ピーク SAR が最大となっており、この場合の傾向は前述した「垂直配置」と「傾斜の位置」のそれらとほぼ一致する。なお、「頬の位置」でのアンテナ入力インピーダンスの変動幅は、「垂直配置」と「傾斜の位置」のそれらよりも大きくなっているが、これは、「頬の位置」では電話機きょう体も顔面に近づくことできょう体電流が変化し、入力インピーダンスも影響を受けることによるものと筆者らは推察する。

しかしながら、実際の携帯電話では、アンテナ出力電力は常に一定とはいえず、またそれがどのように変化するかは通信方式や電力増幅器の設計に依存する。最近の携帯電話については、基地局での電力制御が行われている場合が多く、このとき小児頭部での総吸収電力は成人のそれより小さく（すなわち、より多くの電力が基地局に到達する）、それゆえに小児の場合のアンテナ出力電力は低くなる場合もありえる。したがって、本論文での「一定のアンテナ出力電力」を前提とした局所 SAR の比較検討は、最悪ケースに相当するものと考えられる。

5. む す び

日本人頭部年齢別統計データをもとに、成人頭部モデルを部位に応じて異なる比率で縮小することで、児童に相当する 12 歳児・10 歳児・7 歳児・5 歳児と、幼児相当の 3 歳児の頭部モデルを作成し、それらに対して、携帯電話を「垂直配置」、「頬の位置」、「傾斜の位置」の計 3 種類の配置で頭部内局所 SAR を試算した。その結果、携帯電話を垂直に配置した場合においては、局所ピーク SAR はいずれの年齢の子供の頭部モデルにおいても成人より増加する傾向があること、しかし、実使用状態では局所ピーク SAR の子供と成人との間での差異は小さく、成人と比べると子供のほうが逆に減少する傾向にあること、などがわかった。次に、これらの子供対成人における局所ピーク SAR の大小関

係は、アンテナ入力インピーダンス実部の変化から、おおむね説明できることを示した。

子供の頭部を対象とした脳内温度上昇の定量化と安全性評価が今後の課題である。

文 献

- [1] Independent Expert Group on Mobile Phones, "Mobile phones and health," <http://www.iegmp.org.uk/>, April 2000.
- [2] Om P. Gandhi, G. Lazzi, and C.M. Furse, "Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 MHz and 1900 MHz," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.44, no.10, pp.1884-1897, Oct. 1996.
- [3] F. Schoenborn, M. Burkhardt, and N. Kuster, "Differences in energy absorption between heads of adults and children in the near field of sources," *Health Phys.*, vol.74, no.2, pp.160-168, Feb. 1998.
- [4] 藤原 修, 城向剛博, 王 建青, "携帯電話に対する頭部のドシメトリ解析と安全性評価," *信学論(B)*, vol.J83-B, no.5, pp.720-725, May 2000.
- [5] O.P. Gandhi and G. Kang, "Some present problems and a proposed experimental phantom for SAR compliance testing of cellular telephones at 835 and 1900 MHz," *Phys. Med. Biol.*, vol.47, pp.1501-1518, 2002.
- [6] A.W. Guy, C.K. Chou, and G. Bit-Babik, "FDTD derived SAR distributions in various size human head models exposed to simulated cellular telephone handset transmitting 600 mW at 835 MHz," 24th Bioelectromagnetics Society Annual Meeting, Quebec, June 7-3 2002.
- [7] <http://www.cost281.org>.
- [8] <http://www.cost281.org/download.php?fid=180>.
- [9] J. Wang and O. Fujiwara, "Comparison and evaluation of electromagnetic absorption characteristics in realistic human head models of adult and children for mobile phones," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.51, no.3, pp.966-971, March 2003.
- [10] 人間生活工学研究センター, 日本人の人体計測データ, 1997.
- [11] 加藤則子, 奥野昇正, 高石昌弘, "平成 12 年乳幼児身体発育調査結果について," *小児保健研究*第 49 回日本小児保健協会第 1 報, vol.60, no.6, pp.707-720, 2001.
- [12] 久田智視, 王 建青, 藤原 修, "携帯電話の成人と幼児の頭部を対象とした局所 SAR の比較評価," *信学技報*, EMCJ2001-81, Nov. 2001.
- [13] C. Gabriel, "Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies," Brooks Air Force Technical Report AL/OE-TR-1996-0037, 1996.

(平成 14 年 11 月 7 日受付, 15 年 1 月 27 日再受付)



藤原 修 (正員)

昭 46・3 月名工大・工・電子卒。昭 48・3 月名大大学院修士課程了。同年(株)日立製作所中央研究所入所。昭 51 同所退職。昭 55・3 月名大大学院博士後期課程了。名大工学部助手、講師を経て、昭 60・4 月同工学部助教授、現在、同電気情報教授。平 3~4 スイス連邦工科大客員教授。放電雑音、生体電磁環境、環境電磁工学に関する研究に従事。工博。昭 55 電気学会論文賞、平 12 年度本会論文賞受賞。電気学会、IEEE 各会員。



王 建青 (正員)

昭 59・7 月北京理工大・電子卒。平 3・3 月東北大大学院博士課程了。東北大・工・助手、(株)ソフィアシステムズを経て、現在、名工大・工・助教授。環境電磁工学、生体電磁気学、無線通信工学に関する研究に従事。工博。平 12 年度本会論文賞受賞。

IEEE 会員。



久田 智視 (学生員)

平 13・3 月名工大・工・電気情報卒。平 15 同大大学院博士前期課程了。富士通ソシアルサイエンスラボラトリ勤務。在学中、生体電磁環境工学に関する研究に従事。



渡辺 聡一 (正員)

平 3 都立大・工・電気卒。平 8 同大学大学院博士課程了。同年郵政省通信総合研究所(現、独立行政法人通信総合研究所)入所。現在、電磁環境グループ主任研究員。生体電磁環境に関する研究に従事。工博。平 8・URSI Young Scientist Award、平 9 年度本会論文賞、平 10 年度本会学術奨励賞受賞。IEEE、Bioelectromagnetics 各会員。



山中 幸雄 (正員)

昭 55 名大・工・電気卒。昭 58 同大大学院修士課程了。同年郵政省電波研究所(現、独立行政法人通信総合研究所)入所。現在、電磁環境グループリーダー。EMC の測定法に関する研究に従事。