HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	電波へのばく露による児の精神神経発達への影響に関する最近の研究動向 ： 文献調査
Author(s)	山崎, 圭子; 荒木, 敦子; 田村, 菜穂美 他
Citation	北海道公衆衛生学雑誌, 34(2), 14-21
Issue Date	2021-03
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/84602
Type	journal article
File Information	HJPH 34(2) 14-21.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

総　説

北海道公衆衛生学雑誌
34：13 ～ 20．2020

電波へのばく露による児の精神神経発達への影響に関する最近の研究動向：文献調査

山﨑　圭子[1)]，荒木　敦子[1)]，田村　菜穂美[1)]，寺岡　友里[1)]，日景　隆[2)]
水田　正弘[3)]，大宮　学[3)]，岸　玲子[1)]

要　旨

近年，電波ばく露環境は急速に変化していると考えられ，子どもの健康，特に精神神経発達への影響が懸念される．本研究の目的は，胎児期と出生後のばく露による子どもの精神神経発達への影響について先行研究を概観し，今後の研究の方向性を明らかにすることである．胎児期ばく露を扱った７編のうち３編で妊娠中の母の携帯電話使用状況と精神神経発達の間に負の関連が，１編で正の関連が報告されていた．出生後のばく露を扱った22編では，２編を除き，携帯電話使用状況または電波ばく露レベルと精神神経発達との負の関連が報告されていた．今後の研究では，携帯電話や電子機器の使用状況と電波ばく露による影響を独立に検討する必要がある．また，因果関係を考察するために適した前向き研究デザインを用いることが望ましい．さらに電波ばく露の背後にある交絡要因についても慎重に検討する必要がある．

キーワード：コーホート研究，電波ばく露，認知機能，行動の問題，発達障害

緒　言

電波は，携帯電話やテレビ放送等，今日では国民生活の身近にあり，欠くことのできないものである．近年は携帯電話の使用開始年齢が低下し，屋内でも各世帯において無線LANが整備され，子どもが電波にばく露する機会が増大している．欧州委員会の「新興・新規特定の健康リスクに関する科学委員会（SCENIHR:Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks)」は，時代とともに推移する電波環境の変化を踏まえたうえで安全性を確保するため，ヒトを対象にした疫学研究データが不足していると指摘している．また，WHO（World Health Organization）の電波ばく露調査に関するアジェンダ[1)]では行動と神経機能，がんをアウトカムとして，子ども及び青年を対象とした前向きコーホート研究をhigh priority researchとして提案している．小児の脳腫瘍と携帯電話使用の関連性を評価する疫学研究では，明確なリスク上昇は認められなかった[2,3)]．一方，最新のレビューでは，電波による影響として，精神神経疾患，認知，睡眠，行動の問題などが重要であると指摘されている[4)]．本稿では，これまでに報告された電波ばく露と子どもの健康についての関連研究を概観・整理することにより，今後の研究課題を明らかにすることを目的とした．

対象と方法

文献検索には，米国の国立医学図書館が提供している医学文献データベースPubMedを用いた．胎児期と出生後ではばく露量やメカニズムが異なることが想定されるため，ばく露時期ごとに検討を行った．

胎児期ばく露についての検索では，⑴radio waves [MeSH]，⑵cell phone use [MeSH]に「prenatal」を組み合わせ，Humans，Englishに制限して検索した．この結果，⑴は16編がヒットしたが目的と合致した原著論文は含まれていなかった．⑵は４編がヒットした．１編は脳腫瘍をアウトカムとした論文のため除外した．１編は，ノルウェーの出生コーホートMoBa（Norwegian Mother, Father and Child Cohort Study），残り２編は複数の出生コーホート研究のメタアナリシス及び統合解析の論文であった．そこで，ヒットしたメタアナリシスに含まれていた４つの出生コーホート（韓国MOCEH（MOthers and. Children's Health and Environment），デンマークDNBC（Danish National Birth Cohort），オランダABCD（The Amsterdam Born Children and their Development），及びスペインINMA（INfancia y

1）北海道大学　環境健康科学研究教育センター
2）北海道大学　大学院情報科学研究院
3）北海道大学　情報基盤センター
連絡先：山﨑　圭子
北海道大学環境健康科学研究教育センター
〒060-0812
北海道札幌市北区北12条西７丁目中央キャンパス総合研究棟１号館　北海道大学環境健康科学研究教育センター
ＴＥＬ：011-706-4748
E-mail：kyamazaki@cehs.hokudai.ac.jp

受理日：令和２年12月７日

Medio Ambiente — (Environment and Childhood))) からの報告を個別に検索し，合計７編の論文を抽出した．

出生後ばく露についての検索では，(1)radio waves [MeSH]，(2) cell phone use [MeSH] に「children」を組み合わせ，「sleep」「problem」「cognition」「symptom」のいずれかを追加して，Humans，English に制限して検索した．(1)では40件，(2)では，20件がヒットした．レビュー論文や胎児期ばく露を扱ったものを除き，目的と合致した論文18編を抽出した．また，これらの論文中の３つの出生コーホート（スイスHERMES（Health Effects Related to Mobile phonE use in adolescentS），オーストラリアExPOSURE（Examination of Psychological Outcomes in Students using Radiofrequency dEvices），デンマークDNBC）を個別に検索し，４編の論文を追加した．

結　果

表１に胎児期ばく露について抽出した論文リストを示す．デンマークのDNBCでは，質問票で後ろ向きに調査した母の胎児期の携帯電話使用と６か月・18か月の言語運動発達とは関連しなかったが[5]，７歳児の問題行動のリスクとの間に正の関連が認められた[6]．オランダのABCDでは後ろ向きに質問票により調べた胎児期の母の携帯電話使用と５歳児の問題行動との関連は認められなかった[7]．韓国のMOCEHでは，ドシメトリによる個人のばく露モニタを行った．妊娠中に測定した個人の電波ばく露と精神神経発達に関連は認められなかったが，鉛濃度の高い群では母の携帯電話使用時間と神経発達に負の関連が認められ，著者らは神経発達に影響するとの報告がある鉛ばく露との交互作用があると指摘した[8]．一方，ノルウェーのMoBaでは，携帯電話の使用はむしろ言語やコミュニケーション及び運動スキルへのリスクが軽減される結果が得られた．この結果について，携帯電話の使用を通じた母児の関係性が活性化されたためと著者は考察している[9]．出生コーホート研究４つのメタアナリシスにおいて，母の妊娠中の頻繁な携帯電話使用により問題行動，特に多動や注意欠如のリスクが上昇した[10]．しかし，DNBC, INMA, MOCEHの３つのコーホートの統合解析では，携帯電話使用頻度と子どもの認知との関連は認められなかった[11]．

出生後ばく露について抽出した論文のリストをアウトカムのカテゴリごとに表２に示す．行動の問題については，前向き研究が１編[12]，横断研究が３編[6, 13, 14]，両者をあわせたものが１編[15] であった．韓国のCHEER（The Children's Health and Environment Research）では，鉛の高ばく露群において参加者の報告により収集した携帯電話の通話時間や回数データと注意欠如多動症（ADHD: Attention Deficit Hyperactivity Disorder）傾向に正の関連が見られたが，鉛低ばく露群では関連が見られなかった[12]．また，スイスのHERMESでは，縦断的に解析を行った場合には電波ばく露と行動の問題間に関連は見られなかった．しかし，横断の解析では参加者が報告した携帯電話使用状況の増加が行動の問題のリスク増加や集中力低下と，携帯電話会社が記録した客観的な通話記録やドシメトリによる個人ばく露測定値の上昇が集中力低下と関連した[15]．同様に，スペインのINMAの横断解析の結果では，自宅周辺のRF-EMF（Radiofrequency Electromagnetic Fields）測定値を中央値で２群にした場合の低い群と比較して高い群で，子どもの行動チェックリスト（CBCL: Child Behavior Checklist）における内在化した問題，総合的な問題の得点が高く，また強迫性及び心的外傷後ストレス障害の発症が多かった[13]．またドイツでもドシメトリによる個人ばく露測定値が最も高い群で，子どもの強さと困難さアンケート（SDQ: Strength and Difficulties Questionnaire）の行為の問題が増加することが報告された[14]．横断研究では3編の論文すべてに関連が見られたが，前向き研究では関連がない，または鉛ばく露など他の要因が交絡しているとの報告であった．

認知機能については，前向き研究と横断研究が各４件抽出された．スイスのHERMESによる２件の報告では，モデリングによる脳への推定SAR（Specific Absorption Rate），つまり電波へのばく露によって人体に吸収されるエネルギー量が高くなると，言語と図形の記憶検査のうち，図形の記憶成績が悪化した[16, 17]．この図形記憶が低下するという結果は，携帯電話の通話時間の増加とも関連し，特に右側で携帯電話を使う参加者で顕著であったことから，著者らは図形記憶に関わる脳の左右差との関連を推察している[16]．またオーストラリアのExPOSUREでは，携帯電話を使わない群と比較して，質問票による携帯電話使用回数の増加と反応抑制機能を反映するGo/No-go課題の反応時間低下，問題解決学習を反映するGMLT（Groton maze learning task）のエラー率増加，実行機能を反映するStroop課題における干渉効果の増加が有意に関連した[18]．しかし，同じオーストラリアのMoRPhEUS（Mobile Radiofrequency Phone Exposed Users' Study）では，質問票による携帯電話使用回数とStroop課題成績に関連はなかった[19]．横断研究では，スペインのINMAで自宅周辺のばく露実測値が低い群と比較して高い群では言葉の表現及び理解力が低下した[13]．オランダのABCDでは携帯電話基地局との距離により推定した地域ばく露，母へのインタビューに

より収集した室内ばく露及び子どもの携帯・コードレスフォン使用といくつかの認知機能成績に関連が見られた[20]．具体的には，抑制機能と認知の柔軟性は，地域ばく露と室内ばく露が高いと改善したが，視覚運動協調は地域ばく露が高いと悪化，室内ばく露と携帯利用に伴って改善した．さらに，オーストラリアのMoRPhEUSでは，自己申告の携帯電話の使用状況増加と13歳でのワーキングメモリの正確性低下，単純反応時間の短縮，連合記憶の正確性低下，Stroop課題の完了までにかかる時間の延長など，複数の認知機能との間の関連を報告した[21]．同様にオーストラリアのExPOSRUERでは，８－11歳で携帯電話の使用とGo/No go taskの反応時間の遅れが関連したことを報告している[22]．まとめると，認知機能に関しては，前向き研究４件中３件と横断研究４件すべてで電波ばく露もしくは携帯電話の使用との関連がみとめられた．

神経症状に関して，スイスのHERMESの前向き解析では，テレビや携帯電話基地局からの推定ばく露量と疲労感や集中力の欠如についての複数の指標との正の関連があった[23, 24]．横断研究では，ドイツの２編の論文がドシメトリによる個人ばく露の実測値は慢性症状との関連はないが，ばく露と同日中に影響がでるような急性症状では，頭痛やいらいら，集中力の問題を増加させる関連があったことを報告している[25, 26]．また，キプロスでは軍用アンテナとの距離が近い地域では頭痛やめまいなどの有訴割合が高かったことが報告されている[27]．

睡眠症状についての前向き研究では，スイスのHERMESで，１か月に１回携帯電話による夜間の覚醒があった群では，睡眠疲労と入眠の問題が増加し，ベースラインとフォローアップにおいてスクリーンタイムが長い群では入眠，疲労，活力の欠如，集中力の欠如が増加した[28]．オランダのABCDでは推定地域ばく露量の増加は睡眠時間の増加と関連する傾向はあったが有意ではなかった．一方で，携帯電話の使用頻度の増加は睡眠時間，夜間の覚醒や異常行動，就寝抵抗の望ましくない関連があったと報告した[29]．横断研究では，ドイツのKIGGSでは質問票による調査から，男の子ではPCやインターネットの使用及びスクリーンタイムが長いと不眠の訴えが増加した．女の子では音楽鑑賞の時間の増加が不眠の訴えと関連した[30]．アメリカでは，日中と夜のスマートフォン・タブレットの使用が睡眠阻害と関連した[31]．睡眠については，携帯電話や電子機器の使用がばく露となっており，客観的な電波ばく露指標との関連については報告がなかった．

表１　胎児期ばく露と出生後の精神神経発達

国・対象	研究デザイン	N	年齢	ばく露評価	アウトカム	結果	Ref.
デンマーク DNBC	後ろ向き	41,541	6，18か月	質問票（妊娠中の携帯電話使用）	母による言語運動発達評価	携帯電話使用と６か月・18か月の言語運動発達に関連なし.	5
	後ろ向き	13,159	7歳	質問票（妊娠中の携帯電話使用）	SDQ	携帯電話使用と問題行動のリスクに正の関連.	6
オランダ ABCD	後ろ向き	2,618	5歳	質問票（妊娠中の携帯電話使用）	SDQ	携帯/コードレス電話使用と５歳の問題行動に関連なし.	7
韓国 MOCEH	前向き	質問票 1,198 ばく露測定 210	6，12，24，36か月	質問票（妊娠中の携帯電話使用） 個人ばく露測定値	BSID	質問票，測定値と精神神経発達との関連なし. （妊娠中の鉛濃度の高い群でのみ，携帯電話使用時間が長い群で運動発達の遅れ.）	8
ノルウェー MoBa	前向き	45,389	3・5歳	質問票（妊娠初期の携帯電話使用）	Dale and Bishop Grammar rating, ASQ, CDI	携帯電話使用群で３歳児の文章複雑性及び運動スキルの悪化リスクが低下，５歳児では有意差なし.	9
４か国（ABCD, DNBC, INMA, MoBa, MOCEH）	メタアナリシス	合計83,844	5－7歳	妊娠中の携帯電話使用	SDQ，CBCL	携帯電話使用頻度と多動性／注意欠陥リスクに正の関連.	10
３か国（DNBC, INMA, MOCEH）	統合解析	合計3,089	5歳	妊娠中の携帯電話使用	認知機能（DNBCとMOCEHはWPPSI-R, INMAはMSCA）	携帯電話使用頻度と子どもの認知に関連なし.	11

DNBC (Danish National Birth Cohort), ABCD (The Amsterdam Born Children and their Development), MOCEH（MOthers and. Children's Health and Environment）, MoBa（Norwegian Mother, Father and Child Cohort Study）, INMA(INfancia y Medio Ambiente—(Environment and Childhood)

SDQ：Strengths and Difficulties Questionnaire, CBCL: Child Behavior Checklist, ASQ: Ages and Stages questionnaire，CDI: Child Development Inventory, WPPSI-R : Welchsler Preschool and Primary Scale, MSCA: McCarthy Scales of Children's Abilities,

表2　出生後ばく露と子どもの精神神経発達

研究デザイン	国・対象	年齢	N	ばく露評価	アウトカム	結果	Ref.
行動の問題							
前向き	韓国 CHEER	8－11歳	2422	質問票（電話の使用方法，時間，回数）	K-ARS	関連なし.（妊娠中の鉛濃度の高い群でのみ，携帯電話通話時間・回数とADHD疑いに正の関連.）	12
前向き 横断	スイス HERMES	12－17歳	439	質問票（携帯電話使用状況），携帯電話会社の記録，モデリングによる推定SAR	SDQ FAKT	縦断解析では関連なし．横断解析では参加者による携帯電話使用報告と問題行動に正の関連，参加者と電話会社による携帯電話使用報告及びuplinkを除く合計ばく露測定値と集中力に負の関連.	15
横断	スペイン INMA	9－11歳	男の子 123	子どもの住居の実測値	CBCL	高ばく露地域群で内的・トータルの行動問題が増加.	13
	ドイツ	8－12歳，13－17歳	8－12歳 1498 13－17歳 1524	個人ばく露実測値	SDQ，精神健康	高ばく露群でSDQの行為の問題が増加.	14
	デンマーク DNBC	7歳	13,159	質問票（携帯電話の使用回数，時間など）	SDQ	携帯電話の使用強度と行動の問題に正の関連.	6
認知機能							
前向き	スイス HERMES	13歳	317	質問票（携帯電話使用状況），モデリングによる推定SAR	IST	脳の推定ばく露量と図形記憶成績に負の関連.	16
	スイス HERMES	13歳	439	質問票（携帯電話使用状況），携帯電話会社の通話記録，モデリングによる推定SAR	IST	携帯電話通話時間及び脳と全身の推定ばく露量と図形記憶成績に負の関連.	17
	オーストラリア ExPOSURE	9．9－11歳	412	Interphone 質問票（携帯電話使用状況）	CogHealth test battery, Stroop color-word test	携帯電話使用回数と反応抑制課題中の反応時間に負の関連，問題解決学習エラー率に正の関連.	18
	オーストラリア MoRPhEUS	7歳	236	Interphone 質問票（携帯電話使用状況）	Stroop task	携帯使用回数とストループ課題成績に関連なし.	19
横断	スペイン INMA	9－11歳	男子 123	子どもの住居の実測値	CPT	高ばく露地域群で言語表現・理解が低下.	13
	オランダ ABCD	5－6歳	2354	携帯基地局から推定した地域曝露，母へのインタビュー（WIFIなどの室内ばく露，子どもの携帯・コードレスフォン使用）	Amsterdam Neuropsychological Task, Baseline speed task, Response organization task, Pursuit task, Tracking task	抑制機能，認知の柔軟性と地域・室内ばく露に正の関連．視覚運動協調は地域ばく露と負の関連，室内ばく露や携帯電話利用と正の関連.	20
	オーストラリア MoRPhEUS	13歳	317	インタビュー（電話の回数/週）	CogHealth test battery, Stroop color-word test	携帯電話の使用とワーキングメモリの正確性，単純学習課題・連合記憶課題中の反応時間に負の関連．携帯電話の使用と連合記憶課題の正確性，ストループ課題中の反応時間に正の関連.	21
	オーストラリア ExPOSURE	8－11歳	619	Interphone 質問票（携帯電話使用状況）	CogHealth test battery, Stroop color-word test	携帯電話の使用とGo/No go課題の反応時間が正の関連．コードレス電話の使用とStroop taskの反応時間に正，One card learning課題と同定課題の正答率に負の関連.	22

神経症状							
前向き 横断	スイス HERMES	12－17歳	439	geospatial propagation modelによるテレビや携帯基地局ばく露推定量	質問票（Kidscreen-52, Zerssen Complaint Scale，HIT-6）	縦断解析では携帯電話ばく露と疲労感に正の関連，放送電波ばく露と集中力に負の関連．横断解析では関連なし．	23
	スイス HERMES	12－17歳	439	質問票（携帯電話使用状況），携帯電話会社の記録，モデリングによる推定SAR	質問票（Kidscreen-52, Zerssen Complaint Scale，HIT-6）	縦断・横断分析で携帯電話使用方法が不健康症状と関連．	24
横断	ドイツ	8－12歳 13－17歳	8－12歳 1484, 13－17歳 1508	聞き取り調査，個人ばく露実測値	慢性の症状(過去6か月のHBSC-survey)	ばく露測定値と慢性症状に関連なし．	25
	ドイツ	8－12歳 13－17歳	8－12歳 1484, 13－17歳 1508	聞き取り調査，個人ばく露実測値	急性の症状（24時間に2回Zerssen complaint listの一部に回答）	青年では，午前高ばく露群で午後に頭痛増加，午後高ばく露群で夜にイライラ増加．子どもでは，午後高ばく露群で集中力の問題増加．	26
	キプロス	16歳以下	－	居住村と軍用アンテナの距離	質問票による健康調査	子どもの頭痛やめまいは高ばく露村群で増加．	27
睡眠							
前向き	スイス HERMES	10．4－17歳	843	質問票（夜間の携帯電話の使用），携帯電話会社の記録	質問票（睡眠）	携帯電話による覚醒あり群で睡眠疲労・入眠の問題増加． スクリーンタイム高群で入眠，疲労，活力欠如，集中力の欠如増加．	28
	オランダ ABCD	7歳	2361	携帯基地局から推定した地域曝露，母へのインタビュー（WIFIなどの室内ばく露，子どもの携帯・コードレスフォン使用）	CSHQ	地域ばく露と睡眠時間の関連は有意傾向．携帯電話の使用量が，睡眠時間低下，夜間の覚醒増加，異常行動増加，就寝抵抗増加と関連．	29
横断	ドイツ KIGGS	11－17歳	7533	質問票（テレビ，PC，ビデオゲーム，合計スクリーンタイム，携帯電話，音楽などの使用時間）	質問票（不眠）	男の子でPCやインターネット，スクリーンタイム高群で不眠の訴え増加，ビデオゲーム高群で不眠の訴え減少．女の子は音楽高群で不眠の訴え増加．	30
	アメリカ	3－5歳	402	質問票（夜やベッド内のモバイル電子機器の使用）	CSHQ	タブレット，スマートフォンの使用が睡眠の阻害と関連． ベッド内でのゲームは睡眠時間の短縮と関連．	31

CHEER (The Children's Health and Environment Research), HERMES (Health Effects Related to Mobile phonE use in adolescentS), INMA (INfancia y Medio Ambiente—(Environment and Childhood)), DNBC (Danish National Birth Cohort), ExPOSURE (Examination of Psychological Outcomes in Students using Radiofrequency dEvices), MoRPhEUS (Mobile Radiofrequency Phone Exposed Users' Study), ABCD(The Amsterdam Born Children and their Development), KIGGS(German Health Interview and Examination Survey for Children and Adolescents)

SDQ: Strength and difficulties questionnaire, CBCL: Child Behavior Checklist, K-BIT: Kaufman Brief Intelligence Test, CPT: Continuous Performance Test, CSHQ: Child Sleep Habits Questionnaire, HBSC-survey :Health Behaviour in school-aged children, HIT-6: six-item Headache Impact Test , K-ARS: The Korean version of the ADHD rating scale, IST: Intelligenz-Struktur-Test, CANTAB:Cambridge Neuropsychological Test Automated Battery, specific absorption rates (SAR), Groton maze learning task（GMLT）

考　察

電波ばく露と子どもの精神神経発達の関連についての研究について論じる前に，電波のばく露評価方法について整理しておきたい．本稿で抽出した論文のばく露評価方法は，(1)質問票など参加者からの報告，(2)ドシメトリによる個人の電波ばく露実測値，(3)居住地や携帯電話会社の通話記録などの情報，(4)モデリングによる推定値の４つに分けられる．数としては(1)が最も多く，ほとんどの研究で用いられていた．質問票や電話による聞き取りは解析数を確保できる利点は大きいが，主観的な回答になる可能性が高く注意が必要である．(2)は胎児期ばく露で１件[8]，出生後ばく露ではドイツの３件のみであった[14, 25, 26]．子ども本人の電波ばく露量による影響を客観的に検討できる利点があるが，サンプル数の確保が難しいなどの制約が多いと思われ，HERMES[15] でも測定はしているがサンプル数は91と少なく，サブサンプルとしての扱いにとどまっている．(3)はHERMESの携帯電話会社の記録[15, 17]，INMAの住居における実測[13, 27, 28] が含まれる．参加者の報告のみに頼るわけではない点において客観的な指標といえる．(4)はHERMES[15-17, 23] やABCD[20, 29] で用いられていた．(1)と(3)の一部，そしてそれらを用いて算出した(4)は携帯電話や電子機器の使用方法に関するものが多く，電波ばく露というよりも携帯電話の使用による影響と考えたほうが良いものがある点に注意しなければならない．以上を踏まえ，胎児期と出生後のばく露時期ごとに結果をまとめていく．

胎児期の電波ばく露と子どもの精神神経発達の間の関連は研究によって一貫しなかった．この理由として，いくつかの要因が考えられる．まず研究デザインについて，DNBCによる２件[5, 6] とABCDからの報告では[7]，児の出生後からさかのぼって妊娠中の母の携帯電話の使用状況を調査していた．後ろ向きの調査では思い出しバイアスの可能性があるが，有意な関連が認められたのはDivan, Kheifets, Obel et al. [6] のみであり，一貫していない．一方，前向き研究として妊娠中に携帯電話使用に関する調査を実施したMOCEHとMoBAからの２報では，いずれも妊娠中の母の携帯電話使用と運動発達との間に関連が見られた．ただし，MOCEHのChoi, Ha, Ha et al. [8] では鉛高ばく露群に限り携帯電話の使用時間が長いと運動発達が遅れるという悪影響であるのに対し，MoBAのPapadopoulou, Haugen, Schjolberg et al. [9] では３歳児で携帯電話を使用した母で使用しなかった母よりも運動スキルが低下するリスクが低くなるという報告であり，関連の方向は逆といえる．彼らは，妊娠中の携帯電話の使用が言語やコミュニケーション及び運動スキルの問題へのリスクを軽減する結果が得られたことについて，携帯電話の使用を通じた母児の関係性が活性化されたためと考察している．以上より，妊娠中の母の携帯電話使用と運動発達の間には関連性が想定されるが，そのメカニズムについては電波へのばく露だけでなく文化的な背景を含めた詳細な検討が必要と考えられる．胎児期の電波ばく露評価方法に関しては，MOCEHを除くすべての研究が質問票を使用していた．MOCEHは(2)のドシメトリの手法を用いている点は強みであるが，母体を通して胎児のばく露レベルを評価できていたかどうかについては疑問が残る．胎児のばく露評価方法については，工学的手法による電波の人体伝導率モデリングなどの知見も踏まえて再検討する必要がある．

出生後のばく露については，アウトカムのカテゴリによって結果が大きく異なった．行動の問題については，横断研究では４件すべてに関連が見られたが[6, 13-15]，前向き研究では結果がはっきりしなかった[12, 15]．ばく露評価方法の観点からは，Thomas, Heinrich, von Kries et al. [14] が(2)のドシメトリによる個人ばく露測定値と問題行動，Calvente, Perez-Lobato, Nunez et al. [13] が(3)の客観的情報を用いた評価と問題行動の関連性が見られたことを報告している．また，サブグループ解析として，Roser, Schoeni and Roosli [15] も(2)のドシメトリによる個人ばく露測定値と集中力との負の関連を報告した．因果関係について結論はできないまでも，電波ばく露と子どもの問題行動の間には何らかの関連が推測される．

認知機能については，横断研究４件すべてと前向き研究４件中の３件で関連がみとめられた．前向き研究のうち関連がなかったThomas, Benke, Dimitriadis et al. [19] は，(1)のばく露評価方法により携帯電話の使用回数について調べたものであった．ただし，関連があった前向き研究３件もばく露評価方法は携帯電話の使用や通話記録，それらを用いた推定値が主要なばく露評価であり，電波ばく露と認知機能の関係についての結論は今後の研究を待たねばならない．

神経症状については，前向き研究２件[23, 24] と横断研究３件のうち２件[26, 27] で電波ばく露との関連が報告された．関連がないと報告されたHeinrich, Thomas, Heumann et al. [25] では慢性的な症状について調べており，同じコーホートの研究であるHeinrich, Thomas, Heumann et al. [26] で急性症状と関連しているという報告は，電波ばく露の影響が長期でなく短期的である可能性を示しており興味深い．

睡眠については，有意な関連が報告されたすべてのばく露指標が携帯電話に関するものであった．夜間の光ばく露はメラトニン分泌抑制，深部体温や心拍数の上昇，眠気の低下を引き起こすことが報告されていることか

ら[32]，これらの結果は夜間の携帯電話使用と交絡しており，電波ばく露と関連しているとは結論できない．今後，電波ばく露との関連は，携帯電話の使用状況と分離して検討する必要がある．

以上の先行研究のまとめより，胎児期ばく露に関しては，ばく露評価方法を再検討したうえで研究を進める必要があることが示された．また，出生後のばく露については，全体として電波ばく露との関連が示唆されている研究が多いが，電波ばく露指標と携帯電話や電子機器の使用状況との切り分けを慎重に行っていく必要がある．また，行動の問題など横断研究と前向き研究では結果が異なる場合もあることから，因果関係解明を目指す視点からは前向き研究デザインを採用することが望まれる．さらに，多くの研究は電波ばく露や携帯電話の使用状況と子どもの精神神経発達との関連性を示しているにも関わらず，いずれの研究においても結論は慎重である．電波ばく露についてはこれまでにわかっていない交絡要因も多いと考えられ，また影響を報告することが社会的に大きな影響をもつことがその要因となっているかもしれない．今後の研究を進めるにあたり，電波ばく露レベルの評価は客観的な指標を用いること，前向き研究を用いて疫学的な因果関係に近づくこと，さらに交絡要因について可能な限り多くの可能性を検討したうえで慎重な結論を下すことが必要である．

電波ばく露による子どもの健康，特に高次神経機能への影響についての調査は我が国ではほとんど行われていない．日本では，2020年４月より第５世代移動システム（5G）のサービスが開始しており，今後の普及にともなって，電波環境が大きく変化することが予想される．総務省は電波防護指針を策定し，電波の人体に対する安全性の基準を定めたうえで運用を行っているが[33]，電波環境の変化に伴う子どもの健康影響については注意深くモニタリングしていく必要がある

謝　辞

本研究は総務省委託研究JPMI10001の助成を受けたものです．

文　献

1）Organization WH. WHO research agenda for radiofrequency fields. 2010.

2）Aydin D, Feychting M, Schuz J, et al. Mobile Phone Use and Brain Tumors in Children and Adolescents: A Multicenter Case-Control Study. JNCI Journal of the National Cancer Institute. 2011;103（16）:1264-76.

3）Sato Y, Kiyohara K, Kojimahara N, et al. Time trend in incidence of malignant neoplasms of the central nervous system in relation to mobile phone use among young people in Japan. Bioelectromagnetics. 2016;37（5）:282-9.

4）Hardell L. World Health Organization, radiofrequency radiation and health - a hard nut to crack（Review）. Int J Oncol. 2017;51（2）:405-13.

5）Divan HA, Kheifets L, Olsen J. Prenatal cell phone use and developmental milestone delays among infants. Scand J Work Environ Health. 2011;37（4）:341-8.

6）Divan HA, Kheifets L, Obel C, et al. Prenatal and postnatal exposure to cell phone use and behavioral problems in children. Epidemiology. 2008;19（4）:523-9.

7）Guxens M, van Eijsden M, Vermeulen R, et al. Maternal cell phone and cordless phone use during pregnancy and behaviour problems in 5-year-old children. J Epidemiol Community Health. 2013;67（5）:432-8.

8）Choi KH, Ha M, Ha EH, et al. Neurodevelopment for the first three years following prenatal mobile phone use, radio frequency radiation and lead exposure. Environ Res. 2017;156:810-7.

9）Papadopoulou E, Haugen M, Schjolberg S, et al. Maternal cell phone use in early pregnancy and child's language, communication and motor skills at 3 and 5 years: the Norwegian mother and child cohort study（MoBa）. BMC Public Health. 2017;17（1）:685.

10）Birks L, Guxens M, Papadopoulou E, et al. Maternal cell phone use during pregnancy and child behavioral problems in five birth cohorts. Environ Int. 2017;104:122-31.

11）Sudan M, Birks LE, Aurrekoetxea JJ, et al. Maternal cell phone use during pregnancy and child cognition at age 5years in 3 birth cohorts. Environ Int. 2018;120:155-62.

12）Byun YH, Ha M, Kwon HJ, et al. Mobile phone use, blood lead levels, and attention deficit hyperactivity symptoms in children: a longitudinal study. PLoS One. 2013;8（3）:e59742.

13）Calvente I, Perez-Lobato R, Nunez MI, et al. Does exposure to environmental radiofrequency electromagnetic fields cause cognitive and behavioral effects in 10-year-old boys? Bioelectromagnetics. 2016;37（1）:25-36.

14）Thomas S, Heinrich S, von Kries R, et al. Exposure to radio-frequency electromagnetic fields and behavioural problems in Bavarian children and adolescents. Eur J Epidemiol. 2010;25（2）:135-41.
15）Roser K, Schoeni A, Roosli M. Mobile phone use, behavioural problems and concentration capacity in adolescents: A prospective study. Int J Hyg Environ Health. 2016;219（8）:759-69.
16）Foerster M, Thielens A, Joseph W, et al. A Prospective Cohort Study of Adolescents' Memory Performance and Individual Brain Dose of Microwave Radiation from Wireless Communication. Environ Health Perspect. 2018;126（7）:077007.
17）Schoeni A, Roser K, Roosli M. Memory performance, wireless communication and exposure to radiofrequency electromagnetic fields: A prospective cohort study in adolescents. Environ Int. 2015;85:343-51.
18）Brzozek C, Benke KK, Zeleke BM, et al. Uncertainty Analysis of Mobile Phone Use and Its Effect on Cognitive Function: The Application of Monte Carlo Simulation in a Cohort of Australian Primary School Children. Int J Environ Res Public Health. 2019;16（13）.
19）Thomas S, Benke G, Dimitriadis C, et al. Use of mobile phones and changes in cognitive function in adolescents. Occup Environ Med. 2010;67（12）:861-6.
20）Guxens M, Vermeulen R, van Eijsden M, et al. Outdoor and indoor sources of residential radiofrequency electromagnetic fields, personal cell phone and cordless phone use, and cognitive function in 5-6 years old children. Environ Res. 2016;150:364-74.
21）Abramson MJ, Benke GP, Dimitriadis C, et al. Mobile telephone use is associated with changes in cognitive function in young adolescents. Bioelectromagnetics. 2009;30（8）:678-86.
22）Redmayne M, Smith CL, Benke G, et al. Use of mobile and cordless phones and cognition in Australian primary school children: a prospective cohort study. Environ Health. 2016;15:26.
23）Schoeni A, Roser K, Burgi A, et al. Symptoms in Swiss adolescents in relation to exposure from fixed site transmitters: a prospective cohort study. Environ Health. 2016;15（1）:77.
24）Schoeni A, Roser K, Roosli M. Symptoms and the use of wireless communication devices: A prospective cohort study in Swiss adolescents. Environ Res. 2017;154:275-83.
25）Heinrich S, Thomas S, Heumann C, et al. The impact of exposure to radio frequency electromagnetic fields on chronic well-being in young people--a cross-sectional study based on personal dosimetry. Environ Int. 2011;37（1）:26-30.
26）Heinrich S, Thomas S, Heumann C, et al. Association between exposure to radiofrequency electromagnetic fields assessed by dosimetry and acute symptoms in children and adolescents: a population based cross-sectional study. Environ Health. 2010;9:75.
27）Preece AW, Georgiou AG, Dunn EJ, et al. Health response of two communities to military antennae in Cyprus. Occup Environ Med. 2007;64（6）:402-8.
28）Foerster M, Henneke A, Chetty-Mhlanga S, et al. Impact of Adolescents' Screen Time and Nocturnal Mobile Phone-Related Awakenings on Sleep and General Health Symptoms: A Prospective Cohort Study. Int J Environ Res Public Health. 2019;16（3）.
29）Huss A, van Eijsden M, Guxens M, et al. Environmental Radiofrequency Electromagnetic Fields Exposure at Home, Mobile and Cordless Phone Use, and Sleep Problems in 7-Year-Old Children. PLoS One. 2015;10（10）:e0139869.
30）Lange K, Cohrs S, Skarupke C, et al. Electronic media use and insomnia complaints in German adolescents: gender differences in use patterns and sleep problems. J Neural Transm. 2017;124（1）:79-87.
31）Nathanson AI, Beyens I. The Relation Between Use of Mobile Electronic Devices and Bedtime Resistance, Sleep Duration, and Daytime Sleepiness Among Preschoolers. Behav Sleep Med. 2018;16（2）:202-19.
32）Cajochen C, Munch M, Kobialka S, et al. High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. J Clin Endocrinol Metab. 2005;90（3）:1311-6.
33）総務省. 1990 [Available from: https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/ele/medical/protect/.（2020年11月30日）