

位はなかった。

痛覚刺激に対する aACC と pACC の背側の活動は多くの先行研究でも報告されており、pACC の活動は痛覚強度と相関し、pACC の背側の活動は認知や情動に関連が深いと報告されている。本研究でみられた、second pain に関連すると考えられる C 線維刺激に対して pACC の背側の活動が有意に大きい、という結果は、second pain 認知が first pain 認知よりも情動に関係が強いことを示唆している。前部帯状回は機能的に痛覚関連領域、情動関連領域、非情動関連領域の 3 つの部位に分けられるが、本研究でみられた活動部位は痛覚関連領域と情動関連領域(特に前者)に該当している。

痛覚刺激に対する SMA あるいは pre-SMA の活動は多くの先行研究で報告されている。pre-SMA は運動領域というよりも前頭前野の一部として情動に深く関連する、と報告されており、本研究での結果と一致している。島前部は前部帯状回と連動して痛覚認知の注意や情動に関係する部位とされている。本研究での結果はこの部位が second pain 認知に対してより重要な部位であることを示している。

最近、著者らは、情動と痛覚認知に関して fMRI を用いて研究を行っている。例えば、実際に痛みを与えられなくても注射のような「痛そうな画像」を見ただけでも、pACC と島が活動することを明らかにした¹⁰⁾。これは「心の痛み」と「実際の痛み」は辺縁系では同じように活動することを示しており興味深い。また、瞑想中には痛みを感じないヨガの達人では、瞑想中に痛み刺激を与えても、視床、SII、島、帯状回の活動はみられず、前頭葉、頭頂葉、中脳に活動がみられた¹¹⁾。これらの部位、特に中脳は下行性痛覚抑制系に重要な部位と考えられており、ヨガの達人では、瞑想中は何らかの機序により下行性痛覚抑制系が最大限に活性化されるために、痛みを感じないのだろうと推測した。

むすび

痛覚研究はこれまでは末梢受容体と脊髄レベルでの動物実験が主流であったが、今後はヒト脳内での認知機構の研究がより盛んになっていくものと思われる。痛みの認知は極めて主観的であり、ヒトを対象としなければ理解が困難な点が多いからである。

文 献

- 1) Kakigi R, Watanabe S, Yamasaki H. Pain related somatosensory evoked potentials. *J Clin Neurophysiol.* 2000 ; 17 : 295-308.
- 2) Kakigi R, Inui K, Tamura Y. Electrophysiological studies on human pain perception. *Clin Neurophysiol.* 2005 ; 116 : 743-63.
- 3) Inui K, Tran DT, Hoshiyama M, et al. Preferential stimulation of A δ fibers by intra-epidermal needle electrode in humans. *Pain.* 2002 ; 96 : 247-52.
- 4) Inui K, Tran DT, Qiu Y, et al. A comparative magnetoencephalographic study of cortical activations evoked by noxious and innocuous somatosensory stimulations. *Neuroscience.* 2003 ; 120 : 235-48.
- 5) Inui K, Wang X, Qiu Y, et al. Pain processing in the primary somatosensory cortex in humans. *Eur J Neurosci.* 2003 ; 18 : 2859-66.
- 6) Kakigi R, Tran DT, Qiu Y, et al. Cerebral responses following stimulation of unmyelinated C-fibers in humans: electro- and magneto-encephalographic study. *Neurosci Res.* 2003 ; 45 : 255-75.
- 7) Qiu Y, Inui K, Wang X, et al. Effects of distraction on MEG responses ascending through C-fibers in humans. *Clin Neurophysiol.* 2004 ; 115 : 636-46.
- 8) Wang X, Inui K, Qiu Y, et al. Cortical responses to noxious stimuli during sleep. *Neuroscience.* 2004 ; 128 : 177-86.
- 9) Qiu Y, Noguchi Y, Honda M, et al. Brain processing of the signals ascending through unmyelinated C fibers in humans: an event-related fMRI study. *Cereb Cortex.* 2006 ; 16 : 1289-95.
- 10) Ogino Y, Nemoto H, Inui K, et al. Inner experience of pain: imagination of pain while viewing images showing painful events forms subjective pain representation in human brain. *Cereb Cortex.* 2007 ; 17 : 1139-46.
- 11) Kakigi R, Nakata H, Inui K, et al. Intracerebral pain processing in a Yoga Master who claims not to feel pain during meditation. *Eur J Pain.* 2005 ; 9 : 581-9.

反復磁気刺激の治療への応用

武智 詩子 魚住 武則 辻 貞俊

要旨 rTMSは3発以上規則正しく反復されるTMSと定義されている。rTMSは刺激頻度が1 Hzを越えるものをfast rTMS, 1 Hz以下のものをslow rTMSと2種類に区別され、前者ではコイル直下の大脳皮質の興奮性が増大し、後者では大脳皮質の興奮性は低下すると考えられている。これを利用してさまざまな神経・精神疾患の治療に臨床研究が行われている。

パーキンソン病、脊髄小脳変性症、脳梗塞後遺症、ジストニア、てんかん、うつ病、耳鳴り、慢性疼痛などではrTMS治療の有効性を示す報告がみられる。rTMSの最適刺激条件と有効刺激部位が明らかになり、長期的な影響や作用機序の解明など治療法として確立すれば、神経・精神疾患に対する補助的治療法になることが期待できる。

Key Words : transcranial magnetic stimulation, repetitive TMS, Parkinson disease, stroke, depression, chronic pain

はじめに

経頭蓋磁気刺激法 (transcranial magnetic stimulation, TMS) は、1985年 Barkerら¹⁾が頭部に磁気刺激を与え、手の筋から誘発電位を記録することに成功し、さまざまな脳機能評価に応用されてきた。1990年代に刺激装置の改良が進み、TMSを連続して用いる反復経頭蓋磁気刺激法 (repetitive TMS, rTMS) の方法論が確立した。その後rTMSにより神経活動の抑制、促進が確認されるようになり²⁾、rTMSの刺激中だけでなく刺激後にも及ぶ効果を利用して、神経・精神疾患の治療に応用することが考えられるようになった。

rTMSは3発以上規則正しく反復されるTMSと定義されている。rTMSは刺激頻度が1 Hzを越えるものを高頻度rTMS (fast rTMS)、1 Hz以下のものを低頻度rTMS (slow rTMS) と2種類に区別され、5 Hz以上のfast rTMSではコイル直下の大脳皮質の興奮性が増大し、slow rTMSでは大脳皮質の興奮性は低下す

ると考えられている。このため主に大脳皮質興奮性が低下している病態ではfast rTMSが、逆に亢進している病態ではslow rTMSが治療として用いられている。

近年では新しい刺激方法としてtheta-burst stimulation (TBS)が開発された。従来のrTMSより弱い強度(80%収縮時MEP閾値)で高頻度(50 Hz)3連発刺激を5 Hzで繰り返すものであり、より短い刺激時間で効果を持続させることができる³⁾。

TMSの安全性については、rTMSでは当初からてんかん発作を誘発する可能性がいわれており^{4,5)}、現在でもてんかん患者には原則として禁忌である。また、rTMSでは大脳皮質に強いパルス磁場を与えるため、脳動脈瘤クリッピング術後や心臓ペースメーカー埋込術後なども禁忌となる⁶⁾。「日本臨床神経生理学会 磁気刺激法に関する委員会」「磁気刺激法の臨床応用と安全性に関する研究会」が共同で3回にわたり、TMSの安全性に関する全国調査を行い、重篤な副作用が生じていないことを明らかにしている。また現在までの文献的検索でも重篤な副作用はない⁷⁾。

ここでは rTMS を用いた神経・精神疾患の治療の試みについて述べる。

パーキンソン病

パーキンソン病の治療としては主にドパミン製剤やドパミン受容体作動薬等の内服治療が主体であるが、進行期には薬の効き目が不十分になったり、精神症状、運動合併症や心臓弁膜症などの副作用が問題となる。そのような症例で考慮される脳深部刺激 (DBS) は侵襲的治療であり、適応とならない症例も多く、更に非運動症状を合併させやすい。

1994 年に Pascual-Leone らは、off 状態のパーキンソン病患者を対象に手の運動野へ fast rTMS を与えると、反応時間が改善することを報告した⁸⁾。その後 Ghabra らは 5 Hz の rTMS を運動野に与えたが有意な変化は認められないと報告し⁹⁾、運動野に対する fast rTMS の効果については現在のところ疑問視されている。日本では Shimamoto ら¹⁰⁾ が両側前頭部に運動閾

値の 1.1 倍の強度で 0.2 Hz の slow rTMS を週 1 回繰り返すことにより著明な症状の改善が認められたと報告している。機序としては前頭部 rTMS により線条体のドパミンレベルが増加すること¹¹⁾、GABA 受容体を介した抑制機序異常を改善する¹²⁾ ということが考えられている。その後も表 1 に示すように運動症状に対する rTMS 臨床試験は多く行われている^{8~27)}。最近発表された比較対照臨床試験のメタ解析では fast rTMS では運動症状に対する有意な効果が認められたが、slow rTMS ではほとんど効果がなかったことを報告している²⁸⁾。

本邦における多施設共同研究として、2003 年には、運動野に対する 0.2 Hz rTMS は sham 刺激による臨床改善効果と同等であり、placebo 効果と変わらないことを明らかにした¹³⁾。続いて 2008 年に補足運動野を 5 Hz 週 1 回 800 回の刺激を連続 8 週間行い、UPDRS と自己評価の検討では、sham 刺激と比較し運動症状の有意な改善が認められた¹⁵⁾。他方、パーキンソン病

表 1 パーキンソン病に対する rTMS 治療

著者	人数	刺激頻度	刺激強度	コイル	刺激回数	刺激部位	治療効果
Paosual-Lenone ら (1994) ⁸⁾	6	5	0.9×rMT	8 の字	記載なし	M1	改善
Siebner ら (1999) ¹⁵⁾	12	5	0.9×rMT	8 の字	750	M1	改善
Ghabra ら (1999) ⁹⁾	11	5	0.8~0.85×rMT	8 の字	記載なし	M1	不変
Mally ら (1999) ¹⁶⁾	49	1	0.2×rMT	円形	60 回/日×10日	Cz	改善
Mally ら (1999) ¹⁷⁾	10	1	0.34~0.8×rMT	円形	60 回/日×7日	Cz	改善
Tergau ら (1999) ¹⁸⁾	7	1, 5, 10, 20	0.9×rMT	円形	1000	Cz	不変
Siebner ら (1999) ¹⁹⁾	10	5	0.9×rMT	8 の字	750	M1	改善
Boylan ら (2001) ²⁰⁾	10	10	1.1×rMT	8 の字	2000	SMA	増悪
Shimamoto ら (2001) ¹⁰⁾	9	0.2	700 V	円形	60 回/日×8 週	Cz	改善
Sommer ら (2002) ²¹⁾	11	1	1.2×rMT	8 の字	900	M1	改善
Ikeguchi ら (2003) ²²⁾	12	0.2	700 V	円形	30 回×2/日×2 週	F3, F4	改善
Okabe ら (2003) ¹³⁾	85	0.2	1.1×rMT	円形	50 回/日×8 週	Cz	placebo と同等
Lefaucheur ら (2004) ²³⁾	12	10	0.8×rMT	8 の字	2000	M1	改善
Lefaucheur ら (2004) ²³⁾	12	0.5	0.8×rMT	8 の字	600	M1	改善
Fregni ら (2004) ²⁴⁾	42	15	1.1×rMT	8 の字	200 回/日×10日	左 DLPC	改善
Boggio ら (2005) ²⁵⁾	25	15	1.1×rMT	8 の字	200 回/日×10日	左 DLPFC	改善
Lomarev ら (2006) ²⁶⁾	18		1.0×rMT	8 の字	1200 回/日×1日	両側 DLPFC	改善
Del Olmo ら (2007) ²⁷⁾	13	10	0.9×rMT	8 の字	450 回/日×10日	DLPFC	不変
Hamada ら (2008) ¹⁴⁾	99	5	1.1×rMT	8 の字	1000 回/日/週×8 週	SMA	改善

※厚生労働省班研究, M1: 一次運動野, SMA: 補足運動野, DLPFC: 前頭前野背外側, rMT: resting motor threshold, Cz: 国際 10-20 法に基づく頭蓋頂

は運動症状に加え非運動症状も身体的・社会的活動を妨げる原因となっている。2009年度からは補足運動野 10 Hz, 1 Hz を刺激条件とし、非運動症状の評価を加えた多施設共同研究が開始されている。パーキンソン病は placebo 効果を受けやすいと言われているがこれまでの報告で明らかな有効性が認められており、今後は刺激部位や強度、頻度といった刺激パラメータをより最適にすることにより、さらに有効な治療法となると期待される。

脊髄小脳変性症

脊髄小脳変性症は、脊髄、小脳に病変の主座をもつ原因不明もしくは遺伝性の変性疾患であり、運動失調を主症状とする。現時点では進行を遅らせる可能性のある内服薬やリハビリテーション以外に有効な治療法がない。

Shimizu ら²⁹⁾ は遺伝性脊髄小脳変性症患者に対して円形コイルを用い、小脳半球への 0.2 Hz slow rTMS を 30 パルス/日、連日の治療法を試みている。この方法により、明らかに歩行障害が改善し、刺激後に小脳半球、橋、被殻の血流が増加したと報告している。

2002 年度から全国的な多施設共同研究が行われた。対象患者を皮質性小脳萎縮症と遺伝性脊髄小脳失調症 6 型 (SCA6) に限定し、円形コイルを用いて 0.2 Hz

の slow rTMS を 30 パルス/日×15 日間与えた。結果は小脳刺激群と対照群はともに症状の改善がみられたが、各群間に有意な差はみられなかった。しかし、SCA6 のみの解析では治療開始後 4 週目から 8 週目までの間で、運動野刺激が小脳刺激および sham 刺激と比べて有意な小脳症状の軽減効果が認められた。小脳刺激は大脳皮質を刺激する場合と異なって、有効な刺激が到達しているのか簡単に判定できないこともあるが、今後小脳刺激法のさらなる発展が望まれる。さらに病変の主座でない運動野などの刺激の有効性なども含め、多くの異なる刺激パラメータを用いた報告が待たれる。

脳梗塞後遺症

脳梗塞による片麻痺の治療法としてこれまで、筋電バイオフィードバック療法、非麻痺側上肢の拘束療法 (constraint-induced therapy)、動筋の電気刺激などが報告されているが、回復には限界があり慢性期においては特に困難である³⁰⁾。

大脳半球間の左右の運動野は、脳梁を介して互いに抑制関係を呈していると考えられている³¹⁾。リハビリテーションにおいて constraint-induced therapy が行われるのも、背景として健側の運動野が障害側の運動野の回復に悪影響を及ぼす可能性があることによる。脳

表 2 脳梗塞に対する rTMS 治療

著者	人数	刺激頻度	刺激強度	コイル	刺激回数	刺激部位	効果
Khedr ら (2005) ³⁴⁾	52	3	1.2 × rMT	8 の字	300 回/日×10 日	非梗塞側大脳半球	あり
Mansur ら (2005) ³⁵⁾	8	1	1.0 × rMT	8 の字	600 回	非梗塞側運動野	あり
Takeuchi ら (2005) ³⁶⁾	20	3	1.2 × rMT	8 の字	1000 回	非梗塞側運動野	あり
Boggino ら (2006) ³⁷⁾	1	1	1.1 × rMT	8 の字	1200 回×1 日		あり
Kim ら (2006) ³⁸⁾	15	10	0.8 × rMT	8 の字	160 回×1 日		あり
Fregni ら (2006) ³⁹⁾	15	1	1.0 × rMT	8 の字	1200×5		あり
Talelli ら (2007) ⁴⁰⁾	6	TBS	0.8 × rMT	8 の字	40 秒間	iTBS: 梗塞側大脳半球 eTBS: 非梗塞側大脳半球	一過性に手の麻痺の改善 なし
Lazzaro ら (2008) ⁴¹⁾	12	TBS	0.8 × rMT	8 の字	40 秒間	iTBS: 梗塞側大脳半球 eTBS: 非梗塞側大脳半球	患肢の MEP 振幅増加 患肢の MEP 振幅増加
Mally ら (2008) ⁴²⁾	64	1	出力の 30%	8 の字	200 回/日×1 週	梗塞側運動野	あり
Kirton ら (2008) ⁴³⁾	10	1	1.0 × rMT	8 の字	1200 回×8	非梗塞側運動野	あり
Izumi ら (2008) ⁴⁴⁾	9	0.1	>100% rMT	8 の字	100 回×4	梗塞側運動野	あり
Khedr ら (2009) ⁴⁵⁾	48	3, 10		8 の字		梗塞側運動野	あり

TBS: theta burst stimulation, rMT: resting motor threshold

梗塞急性期には、障害側で MEP の振幅が低下し回復過程で増大する。一方健側では振幅が増大し回復過程で低下し、健側半球の興奮性が高くなり、脳梁を介して患側半球に抑制がかかることが知られている^{32,33)}。これらを根拠として rTMS の治療応用として 1) 患側半球運動野の興奮性を上げる、2) 健側半球の興奮性を抑制する方法が試されている^{34~45)}。

Khedr ら³⁴⁾ は急性期脳梗塞患者の健側運動野に 3 Hz で 300 回/日の 10 日間連続 rTMS と sham 刺激を行い、rTMS 群では臨床症状に改善があり、また MEP 振幅も増大を認めたと報告した。最近では、弱刺激・短時間の刺激で長期的な抑制・促進効果を認める TBS による麻痺手の MEP 振幅の増大が報告されている^{40,41)}。表 2 に主要な臨床研究を示す。概ね対照群と比較して 8-20% の機能改善が一過性ながらも認められているが、今後解明すべき問題点も多い。脳梗塞は他の疾患と異なって病巣の大きさ、障害部位（運動野なのか皮質下・脳幹の錐体路のみかなど）が患者によってさまざまである。したがって個々の症例で機能画像法などを用いてそれらを評価し、患側半球を刺激すべきか健側にすべきか、運動野以外が良いのか判断できるようになればさらに有効性が高まると考えられる。いずれにしても、リハビリテーションに併用する補助療法として、大きな期待が寄せられている。

ジストニア

ジストニアは筋緊張の異常亢進による不随意運動もしくは姿勢の異常である。局所性ジストニアにはボツリヌス治療が第一選択であり、痙性斜頸では極めて有効である。一方書痙のような動作特異性がある場合には障害されていない運動に関与する筋の筋力低下が治療の問題点となる。このような症例に対し rTMS が試されている。

症候性ジストニアの研究から、ジストニアの病態として基底核や基底核が関与する運動系ループの異常が考えられている⁴⁶⁾。電気生理学的には書痙において運動野の 2 連発刺激で short interval intracortical inhibition (SICI) が障害され皮質内抑制が低下していることが示されている⁴⁷⁾。したがって、ジストニア罹患筋に対応する運動皮質を標的にして slow rTMS を行い運動野を抑制するという試みが行われている。

Siebner ら⁴⁸⁾ は書痙患者に対して 1 Hz の slow rTMS を 30 分間与えることにより、筆圧が低下し電気生理学的にも皮質の過剰興奮が減弱したと報告している。島本らは⁴⁹⁾、3 例の痙性斜頸患者に対してパーキンソン病に対して行った同じ方法で両側前頭部に slow rTMS を与えたところ、全例で症状の明らかな改善が認められたとしている。また Murase ら⁵⁰⁾ が行った刺激部位の検討では、運動野、運動前野、補足運動野を比較すると、前頭前野への 0.2 Hz 250 回の刺激で症状が改善したと報告している。また低頻度刺激による皮質内抑制効果と末梢神経ブロックなどの他の治療法を組み合わせることでより長期的な治療効果が期待されている。

てんかん

難治性てんかんの定義は、一般に抗てんかん薬で発作が完全に消失しないてんかんであり、てんかん患者の 30% を占めるとされている。これらの一部は外科手術で発作が消失するが適応が限られている。薬剤と手術以外のてんかん治療として注目されているのが脳刺激による治療である。刺激法には頭蓋内電極を用いて脳を直接電気刺激する方法と rTMS が研究されている。rTMS は非侵襲的な方法という点で直接電気刺激より優れているといえる⁵¹⁾。

磁気刺激により脳の抑制系を刺激するとてんかん発作を抑制（予防）できるという発想のもと、多くの研究が報告されている。赤松ら⁵²⁾ はてんかん重積状態の動物で rTMS を行い、重積状態の改善と優れた死亡率の低下を報告している。これらの成果から rTMS は皮質ネットワークでの興奮性を抑制し、てんかんに対し抗けいれん作用があることが推測される。

Tergau ら⁵³⁾ はてんかん患者 9 例に対して円形コイルを用いて 0.33 Hz の slow rTMS を 500 パルス/日行い、8 例において 6~8 週にわたって発作頻度や重症度が軽減したと報告している。その後も cortical dysplasia や cortical myoclonus などの患者に対しての治療を試みた報告も散見され、中には部分発作重積状態に対して rTMS を行うと発作を止めることが可能であったという報告も認められる⁵⁴⁾。一方 Theodore ら⁵⁵⁾ は、1 Hz で 900 回刺激を二度行うプロトコールで有意差がなかったと報告している。

てんかんに対してrTMSを行った臨床研究をメタ解析したreviewが2007年にBeaらにより報告されており⁵⁶⁾、てんかん発作を誘発した副作用は1.4%にすぎず、また38%の症例で50%以上の発作頻度の減少を認め、rTMSの潜在性有効性は肯定できると結論している。

うつ病

うつ病に対して多くの抗うつ薬が開発され治療結果は向上しているが、それでも薬物抵抗性の患者がおおよそ20%存在すると言われている。このような薬物抵抗性の難治性うつ病に対して、古くから電気けいれん療法(electroconvulsive therapy, ECT)が行われてきた。rTMSはECTに比べてはるかに少ない侵襲で大腦皮質を刺激する方法であるため、うつ病に対するrTMSに多くの関心が集まり、臨床研究の報告は多い。ヒト・動物での研究でrTMSによりセロトニン、5HIAAの海馬での増加、ドパミン分泌が前頭葉で減少し、線条体・海馬で増加、BDNFの増加が認められることが考えられている^{7,57)}。

1993年Hoflichら⁵⁸⁾が初めてうつ病に対して低頻度のrTMSを試した。その後さまざまな刺激方法が試みられたが、いずれも円形コイルを用いたslow rTMSで刺激部位をvertexに設定しており刺激部位は広範囲であった。その後SPECTやPETなどの研究から、うつ病の患者では左の前頭前野背外側部(dorsolateral prefrontal cortex; DLPFC)の血流が低下し、回復過程で血流も改善することが示されるようになり、左DLPFCへのfast rTMSが行われるようになった。Georgeら⁵⁹⁾は1995年に安静時運動閾値の80%の刺激で20 Hz 2秒間の刺激を60秒間の間隔をおいて20回行い5日間実施する方法によりうつ状態が改善したと報告した。以来、左DLPFCを刺激部位として行われる高頻度、強刺激のrTMSの有効性の報告は多く、メタ解析の結果が報告されている。メタ解析のほとんどが刺激条件などの違いはあるものの、左前頭前野に対する2週間連日のrTMSは有意な抗うつ効果を有していると結論づけられている。一方でMartinら⁶⁰⁾の報告では効果がないと結論づけられており、rTMSをうつ病の治療として支持する証拠には乏しいと述べているが、検討対象として取り上げられている報告の大

半が対照(sham刺激)との比較を行っていないことが大きな理由の1つである。

2008年米食品医薬品局(FDA)は、うつ病の治療に用いるTMS刺激装置を初めて認可した。臨床試験ではrTMS治療の6週間後、患者の24%にうつ病評価尺度で有意なスコア改善が認められたのに対し、磁気治療を模倣したプラセボ治療を受けた患者で改善がみられたのは12%であった。これは抗うつ薬の単独使用と同等の効果であった⁶¹⁾。治療費が高いなどまだ問題はあがるが今後日本でも普及するものと推測される。

耳鳴り

耳鳴りは難聴をはじめとしたさまざまな耳疾患で認められ、成人の約10%に生じる非常に多い症状である。治療としては原疾患治療が第一であるが、特発性の耳鳴りはしばしば難治であり、約1%ではQOLに悪影響を及ぼしている。耳鳴りのメカニズムについては十分に解明されていないが、SPECTなどの機能画像的研究から、聴覚皮質の過活動との関連が示唆されている。TMSの機序として聴覚皮質の活動性の変化が関連しているといわれている⁶²⁾。Plewniaら⁶³⁾は、左側頭頭頂部に運動閾値の1.2倍で10 Hz 3秒間の刺激を行い、耳鳴りの改善を報告している。Khedrら⁶⁴⁾は、sham群と比較しrTMSでは明らかに耳鳴り改善を認めるが、1 Hz、10 Hz、25 Hzの刺激頻度間では有意差は認めなかったと報告している。刺激頻度については今後も検討が必要である。また耳鳴りはうつ病と関連があるため、rTMSの耳鳴りに対する効果はうつ病に対する効果の結果生じている可能性も示唆されている。今後は大規模試験と長期的効果の成績が待たれる。

慢性疼痛

難治性慢性疼痛に対しては、抗てんかん薬、抗うつ薬が試されているがすべての患者に有効とはいえない。これら各種薬剤に抵抗性の難治性慢性疼痛患者に対して運動野電気刺激療法が1990年代に開発され一部の患者では明らかな疼痛軽減効果が得られ、治療法の一つとして確立された⁶⁵⁾。運動野電気刺激療法は硬膜外に電極を埋め込み1~10 V、10~100 Hzで刺激す

表3 慢性疼痛に対する rTMS 治療

著者	人数	刺激頻度	コイル	刺激回数	刺激部位	治療効果
Migita ら (1995) ⁶⁸⁾	2	0.2	円形	200	M1	1 人に効果あり
Lefaucheur ら (1998) ⁶⁹⁾	12	20	8 の字	120	M1	あり
Lefaucheur ら (2001) ⁷⁰⁾	18	0.5, 10	8 の字	1000	M1	あり
Lefaucheur ら (2001) ⁷¹⁾	14	10	8 の字	1000	M1	あり
Reid ら (2001) ⁷²⁾	1	20	NR	1200	PFC	あり
Canavero ら (2002) ⁷³⁾	9	0.2	8 の字, DC	200	M1	3 人に効果あり
Rollink ら (2002) ⁷⁴⁾	12	20	C, DC	800	M1	なし
Topper ら (2003) ⁷⁵⁾	2	1, 10	8 の字	720, 400	PPC	あり
Lefaucheur ら (2004) ⁷⁶⁾	60	10	8 の字	1000	M1	あり
Pleger ら (2004) ⁷⁷⁾	10	10	8 の字	120	M1	あり
Lefaucheur ら (2004) ⁷⁸⁾	1	10	8 の字	1000	M1	あり
Khedr ら (2005) ⁷⁹⁾	28	20	8 の字	2000	M1	あり
Andre-Obadia ら (2006) ⁸⁰⁾	12	1, 20	8 の字	1600	M1	5 人に効果あり
Hirayama ら (2006) ⁸¹⁾	20	5	8 の字	500	M1, S1, PMC, SMA	あり
Johnson ら (2006) ⁸²⁾	17	20	8 の字	500	M1, S1	あり
Lefaucheur ら (2006) ⁸³⁾	36	10	8 の字	2000	M1	あり
Lefaucheur ら (2008) ⁸⁴⁾	46	10, 1	8 の字		M1	10Hz で効果あり
Borchard ら (2009) ⁸⁴⁾	4	10	8 の字		PFC	あり

M1 : primary motor cortex, S1 : primary sensory cortex, PFC : prefrontal cortex, PPC : posterior parietal cortex, PMC : premotor cortex

るものである。その機序としては、痛みの原因となる刺激は太い上行線維を介する他の刺激による入力情報によって抑制されるため、病変部位からより中枢に近い部位で刺激を行うことにより疼痛抑制効果が高いと考えられている。よってより高位である一次運動野が疼痛抑制効果をきたす刺激部位として適している⁶⁶⁾。また Garcia-Larrear ら⁶⁷⁾ は運動野刺激後の血流分布を PET で評価し、視床腹外側部、視床内側部、前帯状回、島前部、橋上部の血流増加を報告し、運動野と視床の直接的線維連絡に基づくものと考察している。

運動野電気刺激療法では電極を埋め込む外科的手術が必要であるため、1995 年により侵襲の少ない rTMS によって運動野刺激を行う方法が Migita ら⁶⁸⁾ により行われた。2 人の患者に一次運動野に 0.2 Hz で 200 回刺激し 1 人の患者で効果を見た。その後も一次運動野に対する rTMS の有効性を報告した臨床研究は多く⁸⁶⁾、最近では一次感覚野、運動前野や前頭前野への刺激も試されている (表 3)^{68~85)}。一方 Rollnik ら⁷⁴⁾ は 20 Hz の速度や刺激で統計学的に有意な効果は認め

なかったと報告している。痛みの原因による効果の違いも報告されており、刺激部位と合わせて今後も検討が必要である。

まとめ

神経・精神疾患に対する rTMS による治療について述べた。前述した疾患以外に、片頭痛や神経因性膀胱⁸⁷⁾、認知機能障害 (失語症、半側空間無視、記憶力低下など) にも rTMS は試みられている。rTMS 治療はその安全性および簡便性から試みられる疾患は増える一方である。しかし rTMS の治療効果に関する報告は多いが、まだ十分な症例数を対象にして厳密に対照群と比較した研究が少ないこと、また報告によって刺激頻度、刺激強度、刺激回数、刺激間隔等の刺激条件や刺激部位はさまざまであること、長期的な大脳皮質興奮性の変化の確認されていないなどから現在までのところ rTMS が重要な治療法として確立されるには至っていない。

rTMS の最適刺激条件と有効刺激部位が明らかにな

り, 長期的な影響や作用機序の解明などが確立すれば, 薬物治療に加えて神経・精神疾患に対する新たな治療の選択肢になりえる。

文献

- 1) Barker AT, Freeston IL, Jabinous R, et al : Clinical evaluation of conduction time measurement in central motor pathways using magnetic stimulation of human brain. *Lancet* 1 : 1325-1326, 1986.
- 2) Chen R, Classen J, Gerloff C, et al : Depression of motor cortex excitability by low-frequency transcranial magnetic stimulation. *Neurology* 48 : 1398-1403, 1997.
- 3) Huang YZ, Edwards MJ, Rouinis E et al : Theta burst stimulation of the human motor cortex. *Neuron* 8 : 2787-2791, 2005.
- 4) Daskalakis ZJ, Christensen BK, Fitzgerald PB, et al : Reduced cerebellar inhibition in schizoherenia: a preliminary study. *Am J Psychiatry* 152 : 1203-1205, 2005.
- 5) Hufnagel A, Elger CE, Durwen HF, et al : Activation of the epileptic focus by transcranial magnetic stimulation of the human brain. *Ann Neurol* 27 : 49-60, 1990.
- 6) 玉川 聡, 魚住武則, 辻 貞俊 : 磁気刺激による神経疾患の診断と治療の試み. 日内会誌 94 : 782-787, 2005.
- 7) 辻 貞俊 : 磁気刺激の治療への応用. 臨床神経 45 : 831-833, 2005.
- 8) Pascual-Leone A, Valls-Solé J, Brasil-Neto JP, et al : Akinesia in Parkinson's disease. II. Shortening of choice reaction time and movement time with subthreshold repetitive transcranial motor cortex stimulation. *Neurology* 44 : 892-898, 1994.
- 9) Ghabra MB, Hallet M : Simultaneous repetitive transcranial magnetic stimulation does not speed fine movement in PD. *Neurology* 52 : 768-770, 1999.
- 10) Shimamoto H, Morimitsu H, Sugita S, et al : Therapeutic effect of repetitive transcranial magnetic stimulation in Parkinson's disease. 臨床神経学 39 : 1264-1267, 1999.
- 11) Strafella AP, Paus T, Barrett J, et al : Transcranial magnetic stimulation of the human prefrontal cortex induces dopamine release in the caudate nucleus. *J Neurosci* 21 : RC157, 2001.
- 12) Matsumoto M, Kanno M, Togashi H, et al : Involvement of GABAA receptors in the regulation of the prefrontal cortex on dopamine release in the rat dorsolateral striatum. *Eur J Pharmacol* 482 : 177-184, 2003.
- 13) Okabe S, Ugawa Y, Kanazawa I, et al : 0.2-Hz repetitive transcranial magnetic stimulation has no add-on effects as compared to a realistic sham stimulation in Parkinson's disease. *Mov Disord* 18 : 382-388, 2003.
- 14) Hamada M, Ugawa Y, Tsuji S, et al : High-frequency rTMS over the supplementary motor area for treatment of Parkinson's disease. *Mov Disord* 23 : 1524-1531, 2008.
- 15) Siebner HR, Mentschel C, Auer C, et al : Repetitive transcranial magnetic stimulation has a beneficial effect on bradykinesia in Parkinson's disease. *Neuro Report* 10 : 589-594, 1999.
- 16) Mally J, Stone TW : Improvement in Parkinsonian symptoms after repetitive transcranial magnetic stimulation. *J Neurol Sci* 162 : 179-184, 1999.
- 17) Mally J, Stone TW : Therapeutic and "dose-dependent" effect of repetitive microelectroshock induced by transcranial magnetic stimulation in Parkinson's disease. *J Neurosci Res* 57 : 935-940, 1999.
- 18) Tergau F, Wassermann EM, Paulus W, et al : Lack of clinical improvement in patients with Parkinson's disease after low and high frequency repetitive transcranial magnetic stimulation. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 51 : 281-288, 1999.
- 19) Siebner HR, et al : Short-term motor improvement after subthreshold 5 Hz repetitive transcranial magnetic stimulation of the primary motor hand area in Parkinson's disease. *J Neurol Sci* 178 : 91-94, 2000.
- 20) Boylan LS, Pullman SL, Lisanby SH, et al : Repetitive transcranial magnetic stimulation to SMA worsens complex movement in Parkinson's disease. *Clin Neurophysiol* 112 : 259-264, 2001.
- 21) Sommer M, Kamm T, Tergau F, et al : Repetitive paired-pulse transcranial magnetic stimulation affects corticospinal excitability and finger tapping in Parkinson's disease. *Clin Neurophysiol* 113 : 944-950, 2002.
- 22) Ikeguchi M, Touge T, Nishiyama Y, et al : Effects of successive repetitive transcranial magnetic stimulation on motor performances and brain perfusion in idiopathic Parkinson's disease. *J Neurol Sci* 209 : 41-46, 2003.
- 23) Lefaucheur JP, Drouot X, Von Raison F, et al : Improvement of motor performance and modulation of cortical excitability by repetitive transcranial magnetic stimulation of the motor cortex in Parkinson's disease. *Clin Neurophysiol* 115 : 2530-2541, 2004.
- 24) Fregni F, Santos CM, Myczkowski ML, et al : Repetitive transcranial magnetic stimulation is as effective as fluoxetine in the treatment of depression in patients with Parkinson's disease. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 75 : 1171-1174, 2004.
- 25) Boggio PS, Fregni F, Bermpohl F, et al : Effect of repetitive TMS and fluoxetine on cognitive function in patients with Parkinson's disease and concurrent depression. *Mov Disord* 20 : 1178-1184, 2005.
- 26) Lomarev MP, Kanchana S, Bara-Jimenez W, et al : Placebo-controlled study of rTMS for the treatment of Parkinson's disease. *Mov Disord* 2 : 325-331, 2006.
- 27) Del Olmo MF, Bello O, Cudeiro J : Transcranial magnetic stimulation over dorsolateral prefrontal cortex in Parkinson's disease. *Clin Neurophysiol* 118 : 131-139, 2007.
- 28) Elahi B, Elahi B, Chen R, et al : Effect of transcranial magnetic stimulation on Parkinson motor function-systematic review of controlled clinical trials. *Mov Disord* 24 : 357-363, 2009.

- 29) Shimizu H, Tsuda T, Shiga Y, et al : Therapeutic efficacy of transcranial magnetic stimulation for hereditary spinocerebellar degeneration. *Tohoku J Exp Med* 189 : 203-211, 1999.
- 30) 出江紳一 : 脳血管障害, 磁気刺激法の基礎と応用. 医歯薬出版, pp 198-205, 2005.
- 31) Ferbert A, Priori A, Rothwell JC, et al : Interhemispheric inhibition of the human motor cortex. *J Physiol* 453 : 525-546, 1992.
- 32) Traversa R, Cicinelli P, Pasqualetti P, et al : Follow-up of interhemispheric differences of motor evoked potentials from the 'affected' and 'unaffected' hemispheres in human stroke. *Brain Res* 803 : 1-8, 1998.
- 33) Traversa R, Cicinelli P, Oliveri M, et al : Neurophysiological follow-up of motor cortical output in stroke patients. *Clin Neurophysiol* 111 : 1695-1703, 2000.
- 34) Khedr EM, Ahmed MA, Fathy N, et al : Therapeutic trial of repetitive transcranial magnetic stimulation after acute ischemic stroke. *Neurology* 65 : 466-468, 2005.
- 35) Mansur CG, Fregni F, Boggio PS, et al : A sham stimulation-controlled trial of rTMS of the unaffected hemisphere in stroke patients. *Neurology* 64 : 1802-1804, 2005.
- 36) Takeuchi N, Chuma T, Matsuo Y, et al : Repetitive transcranial magnetic stimulation of contralesional primary motor cortex improves hand function after stroke. *Stroke* 36 : 2681-2686, 2005.
- 37) Boggio PS, Alonso-Alonso M, Mansur CG, et al : Hand function improvement with low-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation of the unaffected hemisphere in a severe case of stroke. *Am J Phys Med Rehabil* 85 : 927-930, 2006.
- 38) Kim YH, You SH, Ko MH, et al : Repetitive transcranial magnetic stimulation-induced corticomotor excitability and associated motor skill acquisition in chronic stroke. *Stroke* 37 : 1471-1476, 2006.
- 39) Fregni F, Boggio PS, Valle AC, et al : A sham-controlled trial of a 5-day course of repetitive transcranial magnetic stimulation of the unaffected hemisphere in stroke patients. *Stroke* 37 : 2115-2122, 2006.
- 40) Talelli P, Greenwood RJ, Rothwell JC : Exploring Theta Burst Stimulation as an intervention to improve motor recovery in chronic stroke. *Clin Neurophysiol* 118 : 333-342, 2007.
- 41) Di Lazzaro V, Pilato F, Dileone M : Modulating cortical excitability in acute stroke: a repetitive TMS study. *Clin Neurophysiol* 119 : 715-723, 2008.
- 42) Málly J, Dinya E : Recovery of motor disability and spasticity in post-stroke after repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS). *Brain Res Bull* 76 : 388-395, 2008.
- 43) Kirton A, Chen R, Friefeld S, et al : Contralesional repetitive transcranial magnetic stimulation for chronic hemiparesis in subcortical paediatric stroke: a randomised trial. *Lancet Neurol* 7 : 507-513, 2008.
- 44) Izumi S, Kondo T, Shindo K : Transcranial magnetic stimulation synchronized with maximal movement effort of the hemiplegic hand after stroke: a double-blinded controlled pilot study. *J Rehabil Med* 40 : 49-54, 2008.
- 45) Khedr EM, Etraby AE, Hemeda M, et al : Long-term effect of repetitive transcranial magnetic stimulation on motor function recovery after acute ischemic stroke. *Acta Neurol Scand* 11, 2009. Epub ahead of print.
- 46) Berardelli A, Rothwell JC, Hallett M, et al : The pathophysiology of primary dystonia. *Brain*. 121 : 1195-1212, 1998.
- 47) Ridding MC, Sheean G, Rothwell JC, et al : Changes in the balance between motor cortical excitation and inhibition in focal, task specific dystonia. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 59 : 493-498, 1995.
- 48) Siebner HR, Tormos JM, Ceballos-Baumann AO, et al : Low-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation of the motor cortex in writer's cramp. *Neurology* 52: 529-537, 1999.
- 49) 島本宝哲ら : 痙性斜頸に対する経頭蓋磁気刺激の治療効果. 機能的脳神経外科 41 : 92-93, 2002.
- 50) 村瀬永子 : 連続時期刺激によるジストニアの治療 : 神経内科 64 : 465-472, 2006.
- 51) 赤松直樹 : てんかん, 磁気刺激法の基礎と応用, 医歯薬出版, pp 229-230, 2005.
- 52) Akamatsu N, Fueta Y, Endo Y, et al : Decrease susceptibility to pentylentetrazol-induced seizures after low-frequency transcranial magnetic stimulation in rats. *Neurosci Lett* 310 : 153-156, 2001.
- 53) Tergau F, Naumann U, Paulus W, et al : Low-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation improves intractable epilepsy. *Lancet* 353 : 2209, 1999.
- 54) Rotenberg A, Bae HE, Takeoka M, et al : Repetitive transcranial magnetic stimulation in the treatment of epilepsy partial continua. *Epilepsy & Behavior* 14 : 253-257, 2009.
- 55) Theodore WH, Hunter K, Chen R, et al : Transcranial magnetic stimulation for the treatment of seizures: a controlled study. *Neurology* 59 : 560-562, 2002.
- 56) Bea HE, Schrader MA, Machii K, et al : Safty and tolerability of repetitive transcranial magnetic stimulation in patients with epilepsy: a review of the literature. *Epilepsy & Behavior* 10 : 521-528, 2007.
- 57) Yukimasa T, Yoshimura R, Tamagawa A, et al : High-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation improves refractory depression by influencing catecholamine and brain-derived neurotrophic factors. *Pharmacopsychiatry* 39 : 52-59, 2006.
- 58) Hoflich G. : Application of transcranial magnetic stimulation in treatment of drug-resistant major depression. A report of two cases. *Hum Psychopharmacol* 8: 361-365, 1993.
- 59) George MS, Wasseman EM, Williams WA, et al : Daily repetitive transcranial magnetic stimulation improves mood depression. *Neuro Report* 6 : 1854-1856, 1995.
- 60) Martin JL, Barbanoj MJ, Schlaepfer TE, et al : Repetitive transcranial magnetic stimulation for the treatment of depression.

- systematic review and meta-analysis. *British J Psychiatry* 182 : 480-491, 2003.
- 61) O'Reardon, JP, Solvason HB, Janicak PG, et al : Efficacy and safety of transcranial magnetic stimulation therapy in the acute treatment of major depression: A multi-site randomized controlled trial. *Biological Psychiatry* 62 : 1208-1216, 2007.
- 62) Pridmore S, Kleinjung T, Langguth B, et al : Transcranial magnetic stimulation: Potential treatment for tinnitus? *Psychiatry and Clinical Neurosciences* 60 : 133-138, 2006.
- 63) Plewnia C, Bartels M, Gerloff C : Transient suppression of tinnitus by transcranial magnetic stimulation. *Ann Neurol* 53: 263-266, 2003.
- 64) Khedr EM, Rothwell JC, Ahmed MA, et al : Effect of daily repetitive transcranial magnetic stimulation for treatment of tinnitus : comparison of different stimulus frequencies. *JNNP* 79 : 212-215, 2008.
- 65) Tsubokawa T, Katayama Y, Yamamoto T, et al : Chronic motor cortex stimulation in patients with thalamic pain. *J Neurosurg* 78 : 393-401, 1993.
- 66) Katayama Y, Fukaya C, Yamamoto T : Poststroke pain control by chronic motor cortex stimulation: neurological characteristics predicting a favorable response. *J Neurosurg* 89 : 585-591, 1998.
- 67) Garcia-Larrea L, Peyron R, Mertens P : Electrical stimulation of motor cortex for pain control: a combined PET-scan and electrophysiological study. *Pain* 83 : 259-273, 1999.
- 68) Migita K, Uozumi T, Arita K, et al : Transcranial magnetic coil stimulation of motor cortex in patients with central pain. *Neurosurgery* 36 : 1037-1039, 1995.
- 69) Lefaucheur JP, Nguyen JPDrouot X, et al : Chronic pain treated by rTMS of motorcortex. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 107 : 72, 2001.
- 70) Lefaucheur JP, Drouot X, Keravel Y, et al : Pain relief induced by repetitive transcranial magnetic stimulation of precentral cortex. *Neuroreport* 12 : 2963-2965, 2001.
- 71) Lefaucheur JP, Drouot X, Nguyen JP : Interventional neurophysiology for pain control: duration of pain relief following repetitive transcranial magnetic stimulation of the motor cortex. *Neurophysiol Clin* 31 : 247-252, 2001.
- 72) Reid P, Pridmore S : Improvement in chronic pain with transcranial magnetic stimulation. *Aust N Z J Psychiatry* 35 : 252, 2001.
- 73) Canavero S, Bonicalzi V, Dotta M, et al : Transcranial magnetic cortical stimulation relieves central pain. *Stereotact Funct Neurosurg* 78 : 192-196, 2002.
- 74) Rollnik JD, Wüstefeld S, Däuper J, et al : Repetitive transcranial magnetic stimulation for the treatment of chronic pain — a pilot study. *Eur Neurol* 48 : 6-10, 2002.
- 75) Töpper R, Foltys H, Meister IG, et al : Repetitive transcranial magnetic stimulation of the parietal cortex transiently ameliorates phantom limb pain-like syndrome. *Clin Neurophysiol* 114 : 1521-1530, 2003.
- 76) Lefaucheur JP, Drouot X, Menard-Lefaucheur I, et al : Neurogenic pain relief by repetitive transcranial magnetic cortical stimulation depends on the origin and the site of pain. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 75 : 612-616, 2004.
- 77) Pleger B, Janssen F, Schwenkreis P, et al : Repetitive transcranial magnetic stimulation of the motor cortex attenuates pain perception in complex regional pain syndrome type I. *Neurosci Lett* 356 : 87-90, 2004.
- 78) Lefaucheur JP, Drouot X, Nguyen JP: Neuropathic pain controlled for more than a year by monthly sessions of repetitive transcranial magnetic stimulation of the motor cortex. *Neurophysiol Clin* 34 : 91-95, 2004.
- 79) Khedr EM, Kotb H, Kamel NF, et al : Longlasting antalgic effects of daily sessions of repetitive transcranial magnetic stimulation in central and peripheral neuropathic pain. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 76 : 833-838, 2005.
- 80) André-Obadia N, Peyron R, Mertens P, et al: Transcranial magnetic stimulation for pain control. Double-blind study of different frequencies against placebo, and correlation with motor cortex stimulation efficacy. *Clin Neurophysiol* 117 : 1536-1544, 2006.
- 81) Hirayama A, Saitoh Y, Kishima H, et al : Reduction of intractable deafferentation pain by navigation-guided repetitive transcranial magnetic stimulation of the primary motor cortex. *Pain* 122 : 22-27, 2006.
- 82) Johnson S, Summers J, Pridmore S : Changes to somatosensory detection and pain thresholds following high frequency repetitive TMS of the motor cortex in individuals suffering from chronic pain. *Pain* 123 : 187-192, 2006.
- 83) Lefaucheur JP, Drouot X, Ménard-Lefaucheur I, et al : Motor cortex rTMS restores defective intracortical inhibition in chronic neuropathic pain. *Neurology* 67 : 1568-1574, 2006.
- 84) Lefaucheur JP, Drouot X, Ménard-Lefaucheur I, et al : Motor cortex rTMS in chronic neuropathic pain: pain relief is associated with thermal sensory perception improvement. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 79 : 1044-1049, 2008.
- 85) Borckardt JJ, Smith AR, Reeves ST, et al : A pilot study investigating the effects of fast left prefrontal rTMS on chronic neuropathic pain. *Pain Med* 10 : 840-849, 2009.
- 86) Leo RJ, Latif T : Repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) in experimentally induced and chronic neuropathic pain: a review. *J Pain* 8 : 453-459, 2007.
- 87) 岡部慎吾, 宇川義一 : 連続経頭蓋磁気刺激の治療の可能性. *神経内科* 64 : 473-480, 2006.

アンサンブル学習法の河川景観満足度 調査データ解析への応用

下川 敏雄¹・武藤由香里²・御園生拓³・北村 眞一⁴

¹非会員 博士(工学) 山梨大学大学院医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11, E-mail; shimokawa@yamanashi.ac.jp)

²学生会員 山梨大学大学院医学工学総合教育部持続社会形成専攻 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11, E-mail; g07mf014@yamanashi.ac.jp)

³非会員 Ph.D in Biology 山梨大学大学院医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11, E-mail; mist@yamanashi.ac.jp)

⁴正会員 工博 山梨大学大学院医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11, E-mail; skita@yamanashi.ac.jp)

近年、河川開発と景観に関する多くの報告が行われている。その調査の多くがアンケートに基づいており、その結果は重回帰分析のような線形モデルによって処理される。ただし、真の構造が単純な線形関係で得られることは殆どなく、非線形構造、および交互作用を伴うことが多い。本論文では、これらの複雑な構造を適切に捉えるだけでなく、その結果をグラフィカルに解釈できるアンサンブル型学習法の適用について述べた。そして、その有用性は河川景観満足度に関するアンケート調査¹⁾への適用により提示した。その結果、アンサンブル型学習法を適用することで、重回帰分析、あるいは樹木構造接近法に比べて良好なモデル適合度をもつだけでなく、より有用な知見を見出すことができた。

Key Words : Multivariate Additive Regression Trees, Interaction Effect, Variable Importance, Nonlinear Regression Models

1. 序

近年、河川開発と景観に関する多くの報告が行われている。またそうした研究を元に河川景観の設計に関する著作やマニュアル類が出版されている。

例えば、近年の和田他²⁾による大正川に関する調査では、河川の改善事業として望むことは、水質の改善、豊かな自然、親水空間の演出であることが報告されている。また、小路他³⁾は、緑、人工構造物、景観障害物が、景観評価に与える影響が大きいことを提示している。さらに、市民満足学会・(株)ワード研究所⁴⁾は、インターネット上での河川景観満足度に対する大規模調査を行い、重相関分析により河川景観満足度と与える影響を調査した。その結果、重要な要素として自然、うるおい、町並み・田園との調和、統一感、水質、堰や橋、安全が挙げられたことを報告している。河川景観の研究を基礎にした著作には、例えば土木学会編⁵⁾、島谷幸広編著⁶⁾などがあり、マニュアル類としては、建設省中国地方建設局太田川工事事務所⁷⁾、河川景観の形成と保全の考え方検討委員会編⁸⁾などが代表的であるが、これらはいずれも河川景観のデザイン面からの技術を提供するものである。

アンケート調査だけでなく、多くの回帰問題においては、一般に重回帰分析および、その他の線形モデル、例えば主成分回帰、部分最小2乗法などが頻用されている。線形モデルは説明変数あるいはその合成変数の線形結合によりモデルが構成されるため、結果の解釈は平易である。ただし、実際の事象はこのような単純なモデルで捉えられることは少なく、非線形構造をもつことが多い。さらに、説明変数間の交互作用関係(相乗関係)は予めモデルに組み込まなければならない。

一般に、回帰分析の目標は、(1)応答の良好な予測ができること、および(2)応答と説明変数の関連性(推定モデルの解釈)を明らかにすること、の二つに分けて捉えられるが、線形モデルが目標(1)を充足していると言いはない。当てはまりの粗悪なモデルによる解釈は、誤った結論を導く恐れがある。

目標(1)に重点をおくのであれば、一般化加法モデル⁹⁾、ニューラル・ネットワーク¹⁰⁾などの適用が考えられる。ただし、これらの方法では、影響要因と結果のあいだの関係がブラックボックス化されるため目標(2)が不十分になる。

これに対して、目標(2)に重点をおいた重回帰分析の代替手法として、樹木構造接近法(あるいは決定木)が注目されている。この方法の利点は、モデルの非線形性あるいは交互作用関係を、解釈が平易なプロダクション・ルールによって与えることができることにあり、その有用性は多くのデータ・マイニングの成書で指摘されている(例えば、Witten & Frank¹⁾を参照)。

ただし、樹木構造接近法による近似はステップ関数に基づくため、真のモデルが線形構造を持つ場合には不適切な結果を導く。また、一般に樹木構造接近法の予測精度は低いことも指摘されている⁹⁾。

これらの二つの目標を達成することは、アンケート調査の結果に内在する複雑な構造を適切に捉えるだけでなく、そこに新たな知見を見出すことに強く寄与すると考えられる。そのための一つの戦略は、目標(2)を満たす樹木構造接近法のモデル適合度を向上させ、目標(1)を満たすことである。本論文では、このような統計的学習法として、アンサンブル学習法をとり上げる。アンサンブル学習法とは、複数個の樹木モデルの加法型でモデルを構築することで、樹木構造接近法の利点を保持しながらモデル適合度を向上することができる方法である。また、変数重要度や部分従属度といった統計量を用いることで、影響要因と結果の間の関係を明らかにすることもできる。これにより、これまでのアンケート調査の分析では得られなかった、非線形関係、あるいは要因の影響の大きさが高い予測性能のもとで解釈できる。

ここでは、ワード研究所の河川快適性に関するアンケート調査をもとに、影響要因の評価を行う。アンサンブル型学習法のなかでも、とくに多重加法型回帰樹木(MART法)¹⁰⁾に注目し、重回帰分析、樹木構造接近法、あるいはその他の回帰手法との性能を比較することにより、MART法によるデータ分析がこれまでの方法よりも、より多くの知見を与えることを示す。

2. アンケート調査に対する諸種の統計的方法とその問題点

一般に、本研究で扱う景観評価の要因分析は、提示する対象のイメージ、操作できる要因の設定、アンケート対象者あるいは実験の被験者の相違によって、種々異なる結果を得ている。操作要因は大別して、物理的要因、画像的要因、心理的要因に分けられる。物理的要因としては、河川の自然の保全されている状況(水質、植生など)や建設されている人工構造物(護岸の材料や形態など)が挙げられる。画像的要因は、評価する写真などの特性で、色彩の組み合わせと面積配分、電線や物体の輪郭線などの錯綜度や統一度やフラクタル次元などである。心理的要因は、景観から受ける心理的尺度の反応で、整

然性、活動性、親近性、賑わい感などである。これらをまとめると、河川景観の評価は、(1)河川の物理的特性、(2)河川を見る視点すなわち写真の取り方による画像的特性、(3)河川から受ける感性的印象の複合的影響に依るものと考えられる。

河川イメージの提示では、河川の現場の写真、CGによる合成画像、河川の特定の場所の記憶(地名や河川名)などが用いられている。アンケート対象者は、限られた地域の住民が多く、その数は数百人から数千人、被験者は学生や研究所などの職員、人数も数十人程度に限定され、それぞれの操作要因の限定、現状の河川の範囲、CG表現の限界、被験者特性などによる偏りが生じている。今回用いた(株)ワード研究所の調査データは、実際の現場の河川を対象とし、河川の景観の記憶に基づく判断、回答者数は十分多いが、登録されたアンケート対象者の限定といった限界がある。

こうしたデータの制約に基づく適用可能性と普遍性の限界があるが、これらは研究事例を重ねていくことによって普遍的真理へアプローチするものと考えられる。

計量データから、順序データ、カテゴリーデータ等によって要因を分析する統計的手法には、線形の回帰分析として代表的な重回帰分析から、順序データを扱うコンジョイント分析、カテゴリカルな回帰分析としての林の数量化理論1類・2類などがあるが、これらの分析手法の問題点としては、(1)尺度化の問題(人間は選好順位、間隔尺度、比率の判断が可能であるか、またその信頼性の程度はどのくらいか)、(2)多変量解析などの統計的分析手法の問題は、非線形性、変数の適用範囲、予測の精度とその評価(適合度、的中率など)をどうするか、などが挙げられる。

3. 樹木構造接近法

樹木構造接近法は、モデルへの適用結果が「樹木」によってグラフィカルに表現される。樹木表現は、複雑な非線形効果や交互作用効果に対する鋭い洞察を与えるだけでなく、さらに、複数の尺度が混在した場合にも平易な解釈ができる。分類回帰樹木(CART:Classification And Regression Tree)¹⁴⁾は、樹木構造接近法を飛躍的に進歩させ、社会科学・工学・医学などの諸種の応用分野に広く関心を与えている⁹⁾。

(1)CART法

CART法は、データを説明変数空間に沿って2分岐させることで、モデルをあてはめる。このとき、分岐させた部分集合(ふし)内の応答の予測値には、平均値あるいは中央値が用いられる。したがって、CART法では、ステップ関数が当てはめられる。そのモデル構築の過程は、(1)分岐過程、(2)刈り込み過程、(3)最適樹木の選定過程、

から成る。

分岐の評価基準には、2分岐されたそれぞれの部分集合の応答に対する不均一性の測度が用いられる。いま、

応答 $\{y_i\}_{i=1}^n$ とそれに対応する p 次元説明変数ベクトル $\{x_i\}_{i=1}^n$ が与えられたとき、任意の部分集合(ふし) t に属する $|t|$ 個の個体の応答 y に関する平方和は

$$\varphi(t) = \sum_{i \in t} \{y_i - \bar{y}(t)\}^2$$

である。ここに、 $\bar{y}(t)$ は、 t に含まれる個体の応答の平均値(あるいは中央値)である。分岐過程では、上式が最小となる最適分岐変数および分岐点を探索し、逐次に分岐を続ける。この分岐の仮定は樹木形式のグラフィクスで表示することが多く、これが樹木構造接近法の名前の由来になっている。この樹木の成長過程は、任意の停止基準に到達するまで続けられる。分岐過程で得られる樹木は、一般に過剰適合を示していることが多く、以後の過程ではモデル適合度と簡便さのトレードオフを意図して実行される。

刈り込み過程では、分岐過程により得られた過剰適合な樹木を、刈り込み基準(複雑度コスト)に基づいて、根幹ふし(分岐のない状態)まで、分岐点を逐次に削除する。これにより、大きな樹木から根幹ふしまでの巣籠もり状の樹木系列が得られる。

そして、部分樹木系列のなかから残差平方和推定値(例えば交差確認推定値)を用いて、これが最小になる部分樹木を最適モデルとして選択する。

CART法により得られたモデルは

$$h(x; \{t_m\}_{m=1}^M) = \sum_{m=1}^M \hat{\beta}_m I(x_n \in t_m) \quad (3.1)$$

で与えられる。ここに、 $\hat{\beta}_m = \bar{y}(t_m)$ であり、 $I(\cdot)$ は括弧内が真なら1、偽なら0を返す指標関数であり、 $m(=1, \dots, M)$ は終結ふし(最終の部分集合)を表す。また、パラメータの推定はふし内の観測値の平均値あるいは中央値で行われる。

CART法の利点を以下に示す：(a) 分岐点の探索は、全ての説明変数の分岐候補を評価するだけなので、外れ値の影響が小さいだけでなく、多重共線性の影響を受けない、(2) 説明変数の数が標本サイズを上回る場合でもCART法は適用できる、(3) 説明変数に対する単調変換に対して不変であるため、重回帰分析で用いられる変数変換(例えば対数変換)を必要としない、(4) 変数の尺度あ

るいは欠測値を考慮しなくても適用できる。したがって、アンケート調査のような複数の尺度があるデータ解析に適している。すなわち、前節で挙げた既存の統計分析手法の問題点をCART法は回避することができる。

(2) 変数重要度

CART法のもう一つの利点は、ある応答に対して各説明変数がどの程度の重要度をもつかを統計量により明らかにできる点にある。ただし、得られたCART樹木のみに基づく解釈だけでは、分岐に用いられていない説明変数の効果は隠される。例えば、ある説明変数は最初に分岐で2番目に良い分岐ルールを持ったが、最終的には樹木分岐として採用されなかったとする。この場合に、その変数の重要度を0とすることが必ずしも適切であるとは限らない。そのため、変数重要度の算出方法には若干の工夫が行われている。すなわち、CART樹木の変数重要度は、得られたCART樹木の分岐変数とは異なる変数(代理変数)で分岐を行ったときの残差の減少量(改善度)を用い、この改善度を(分岐過程で得られた)樹木の全ての分岐点で計算する。そして、それぞれの変数の重要度は、これらの改善度の総和により定義される。

通常、変数重要度は、最大の変数重要度をもつ変数の値を100としたときの相対指標として解釈される。

4. アンサンブル型学習法

線形回帰法は、説明変数と応答の非線形構造を適切に捉えることができないだけでなく、説明変数間の交互作用効果を事前にモデルにとり込まなければならない。他方、CART法では非線形構造および交互作用効果を解釈が平易な樹木によって提示できるものの、その近似はステップ関数に基づくため、真のモデルが線形構造を持つ場合には不適切な結果を導く¹⁴⁾。さらに、CART法のモデル適合度は低いことも二三の論文で指摘されている⁹⁾。近年、諸種のアンサンブル学習法、例えばBagging法¹¹⁾やRandomForest法¹³⁾が提案されている。

アンサンブル学習法とは、線形回帰モデルあるいは、CARTモデルといった学習器を反復してあてはめることで、より強力な予測力をもつモデルを生成する統計的学習法の一つである。

とくに、CART樹木をアンサンブル結合するブーステイング 樹木法は、CARTの長所を保持しながら、その欠点の予測性能を向上することに成功している。これは、MART法(Multiple Additive Regression Trees: 加法型重回帰樹木)と名づけられている⁹⁾。

(1) MART法

MART法は、CART法の予測精度を向上させる目的で、

CART樹木にブースティングを加味する方法として考案された。ブースティングとは、関数空間における最適化アルゴリズムとして提案された方法である¹²⁾。また、ブースティング法の非常に興味深い側面は、データの背後にある潜在モデルに含まれる主効果項あるいは交互作用項のような構造的な推定問題にも魅力的な効用を発揮することである。このことは、アンケート調査のような複雑な構造を適切に捉えることに寄与すると考えられる。

観測値 $\{y, x\}$ が与えられたとき、MART法によるブースティング法の目標は、(微分可能な)損失関数 $L(y, f(x))$ の期待値を最小にするモデル

$$f^*(x) = \arg \min_{f(x)} E[L(y, f(x))] \quad (4.1)$$

を推定することである。本論文では、線形回帰法あるいはCART法と同様に、損失関数には、最小2乗基準損失関数

$$L(y, f(x)) = (y - f(x))^2 \quad (4.2)$$

を用いる。

B 個のCART樹木 $h(x; \{t_m^{(b)}\}_{m=1}^{M_b})$ より得られる、MART法の推定モデル $\hat{f}_{\text{boost}}^{(B)}(x)$ は、加法的な展開のもとで逐次的に式(4.1)を近似することで、

$$\begin{aligned} \hat{f}_{\text{boost}}^{(B)}(x) &= \sum_{b=1}^B v \hat{\omega}_b h(x; \{t_m^{(b)}\}_{m=1}^{M_b}) \\ &= \sum_{b=1}^B v \sum_{m=1}^{M_b} \hat{\omega}_b \hat{\beta}_m^{(b)} I(x_n \in t_m^{(b)}) \end{aligned}$$

により得られる。ここに、 $\hat{\omega}_b$ は、 b 番目のCART樹木

での重みパラメータの推定値であり、 $v(0 < v \leq 1)$ は、

学習効率を制御するための任意の縮小パラメータである。

このとき、重みパラメータおよび樹木の推定を同時に行うことは困難なため、MART法でのブースティングでは、重みパラメータ ω_b を推定する過程と、樹木

$h(x; \{t_m^{(b)}\}_{m=1}^{M_b})$ を推定する過程を交互に繰り返す反復アルゴリズム(ステージワイズ戦略)を採用している。

通常、回帰モデルの推定において、「ステップワイズ」

戦略が頻用されている。ステップワイズ戦略では、変数(あるいは基底関数)が追加される毎に、モデルに含まれる全てのパラメータが調整されるのに対して、ステージワイズ戦略では、パラメータの調整は必要としない。さらに、ステージワイズ過程では、これらの推定を最急降下法に類似する更新手続きとして捉え、損失関数(4.2)に対してCART樹木を当てはめるのではなく、その偏微分したもの(これを疑似残差と呼ぶ)に対して当てはめる。

(2) 変数重要度の拡張

MARTモデルが、複数のCART樹木の加法形であることから、変数重要度は、CART樹木の場合と同様に定義できる。ただし、CART樹木における代理変数による変数重要度の定義は採用しない。もともと、CART法で代理変数を用いた理由は、単一の樹木の分岐でマスキングされた変数の影響をできる限り公平に要約することにある(3.2節参照)。これに対して、MART法では多数の樹木を扱うが、このことは単一の樹木におけるマスキング変数の影響を考慮することにも繋がる。したがって、MART法での変数重要度は、推定された複数のCART樹木での改善度(それぞれのCART樹木の構成に出現しなかった変数の改善度は0である)の算術平均値によって定義される。

(3) 部分従属度

MART法では、応答と説明変数のあいだの関数関係を明示できない。そのため、Friedman¹⁰⁾は、これらの関係をグラフィカルに捉えるための方法、すなわち、部分従属プロットを提案している。

いま、関心がある p^+ ($p^+ = 1, 2$) 個の説明変数を z_i と

し、それ以外を z_i^c とする。すなわち、 $x_n = z_n \cup z_n^c$ である。

したがって、推定されたMARTモデル $\hat{f}_{\text{boost}}^{(B)}(x)$ を

$\hat{f}_{\text{boost}}^{(B)}(z_i, z_i^c)$ と書くことができる。このとき、ある固定

された z_i^c のもとで $\hat{f}_{\text{boost}}^{(B)}(x|z_i^c)$ が z_i^c のバラツキに強く

影響を受けないという仮定すると、 z_i の部分従属度¹⁰⁾は

$$D(z_i) = \int \hat{f}_{\text{boost}}^{(B)}(z_i, z_i^c) d \text{Pr}(z_i^c) \quad (4.3)$$

で定義できる。ここに、 $\Pr(z^c)$ は z^c の周辺確率密度である。実際には、式(3.3)の経験推定値

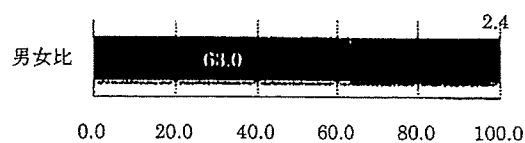
$$\hat{D}(z_i) = \sum_{l=1}^n \hat{f}_{\text{boost}}^{(B)}(z_i, z_l^c) / n$$

を用いる。このとき、部分従属プロットは、座標軸上に $(z_i, \hat{D}(z_i))$, $i=1, 2, \dots, n$ をプロットし、それぞれを折れ線グラフによって結びつけることで構成される⁹⁾。

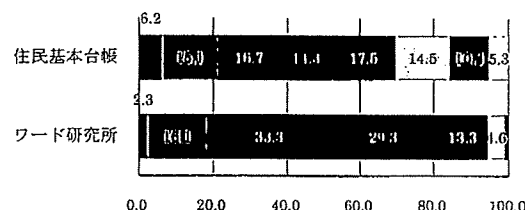
6. 河川景観満足度調査に対するアンサンブル型学習の適用

河川景観の満足度の現況を調査する目的で、平成17年6月30日から7月24日にかけて、(株)ワード研究所によってアンケートが実施されている。このアンケートは、全国を対象にしたインターネット調査の方法で行われており、12,189名の回答が得られた。本データの解析の目標は、河川の満足度に対する影響は何かを探索することにある。

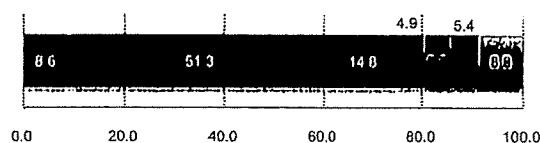
回答者の背景を図-1に提示する。男女比は、男性のほうが女性に比して約30%程度高かった ($n=12189$)。年代では、30代から40代にかけての比率が住民基本台帳に比して高く、他方、60代以上の高齢者の比率が低かった ($n=11509$)。さらに職業別では、会社員・団体職員・公務員が半数を占めており、また、主婦の比率



(a) 性別(棒グラフは、左から順に、男性、女性、不明で構成されている)



(b) 年齢(棒グラフは、左から順に、10代、20代、30代、40代、50代、60代、70代(1.0%)、80代以上(0.4%)で構成されている)



(c) 職業(棒グラフは、左から順に、自営業主、家族従業者(0.7%)、会社・団体職員・公務員(パート含む)、主婦、学生、無職、その他、不明で構成されている)

図-1 河川景観満足度アンケートの要約

表-1: アンケート項目に対する相関行列

	水量	自然度	水質	ゴミ	四季	親水性	安全性	生態系	橋・堰	コンクリート	応答
水量	1.000										
自然度	0.409	1.000									
水質	0.340	0.664	1.000								
ゴミ	0.237	0.557	0.706	1.000							
四季	0.302	0.513	0.504	0.479	1.000						
親水性	0.280	0.441	0.461	0.421	0.506	1.000					
安全性	0.176	0.389	0.477	0.496	0.442	0.559	1.000				
生態系	0.196	0.510	0.518	0.439	0.478	0.439	0.433	1.000			
橋・堰	0.284	0.413	0.426	0.425	0.473	0.432	0.454	0.427	1.000		
コンクリート	0.217	0.565	0.464	0.463	0.399	0.366	0.350	0.447	0.445	1.000	
応答	0.342	0.614	0.603	0.578	0.594	0.548	0.532	0.509	0.550	0.519	1.000

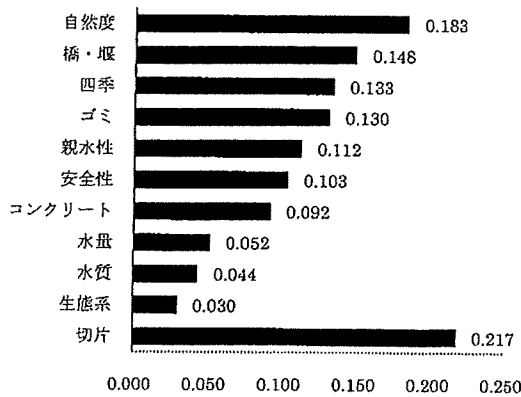


図-2 重回帰分析の回帰係数

も14.8%であり、2番目に高かった ($n=12189$)。これは、本アンケートがインターネットで実施されていることから、インターネット利用率の比較的多い層が、そのままアンケートの回答者背景に反映されていると推察できる。

本アンケートの内容のなかから、ここでは、河川景観満足度に影響をあたえる項目(説明変数)として、

- ・ 水量が富に流れている(水量)。
- ・ 自然がしっかり保全され、残っている(自然度)。
- ・ 水質がしっかり保全されている(水質)。
- ・ ゴミがなくてきれい(ゴミ)。
- ・ 時の変化(季節・気象・朝夕)がすばらしい(四季)。
- ・ 水辺の遊びなど、人々の活動がたのしい(親水性)。
- ・ 安全で安心する(安全性)。
- ・ 鳥や魚や虫など生物に親しめる(生態系)。
- ・ 堰や橋などが美しい(橋・堰)。
- ・ コンクリートが少なくてよい(コンクリート)。

をとりあげ、全体の満足度を表す項目(応答変数)として、「対象となる河川に満足していますか」をとり上げる。ワード研究所のアンケートでは、その他の項目として、4項目「水辺の町並みや田園と調和して美しい」「日々の生活の中で潤いを与えてくれる」「整然として統一感がある」「全体としての雰囲気すばらしい」がある。ただし、これらの項目は、河川に対する印象を意味しており、河川景観満足度に対する具体的な意味として解釈できない。そのため、本論文では、これらの項目は除外した。

表-1にアンケート項目と応答での相関行列を示す。自然度、水質そして四季の順で応答との相関が高かった。他方、水量との相関が最も低かったものの、相関係数が0.342であり、さほど低くなかった。水質とゴミ、水質と自然度の相関係数が0.6以上だった。

(1) 重回帰分析の適用

既存のアンケート結果の分析に倣い、重回帰分析を実施した。このときの回帰係数の一覧を図-2に示す。その結果、自然度の回帰係数が最も高く、次いで橋・堰が高かった。他方、水量、水質、生態系といった項目の回帰係数が低かった。因に、重回帰分析の適用では、多重共線性の回避あるいはモデルの簡便化(安定性)意図して、変数選択を行うことがある。本データに対してもCp統計量に基づく変数選択を実行したが、取捨される変数はなかった。このとき、全ての回帰係数に対する検定のp値は、有意水準0.0001のもとで有意であり、係数の適切性が示唆されている。

さらに、自由度調整済み寄与率 $R^{2*} = 0.580$ である

ことから、比較的良くあてはまっている。ただし、橋・堰の相関係数が2番目に低かったにもかかわらず、重回帰係数が自然度に次いで高かった。さらに、自然度や四季といった景観のポジティブな要因が、河川景観満足度に強く寄与している一方で、ゴミや水質といったネガティブな要因の効果がそれほど高くなかった。

(2) CART法の適用

図-3にCART法での結果を示す。ここで、灰色の四角の上側の数字がふし内の応答の平均値を表しており、下側の数字がふしに含まれる標本サイズを表している。全観測値は、先ず、自然度によって分割され、その点数が2以下の観測値は次いで橋・堰によって分割され、それ以外の観測値はゴミによって分割され、最終的に9個の終結ふしに分割された。このとき、分割変数として自然度、橋・堰、水質、ゴミ、四季、および親水性が選択された。他方、生態系や水量、安全性、そしてコンクリートといった項目は出現しなかった。したがって、重回帰分析でも回帰係数が最も高かった自然度による影響が最

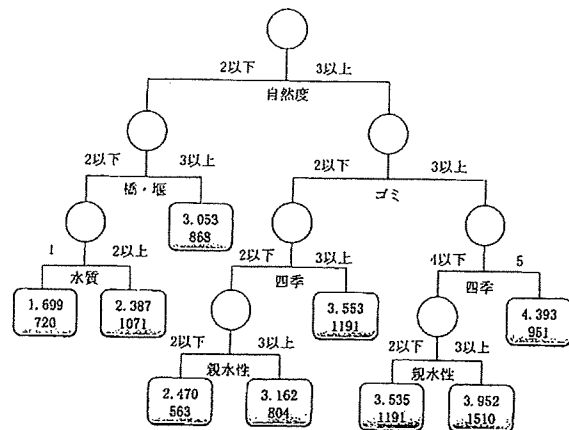


図-3 CART 樹木の結果

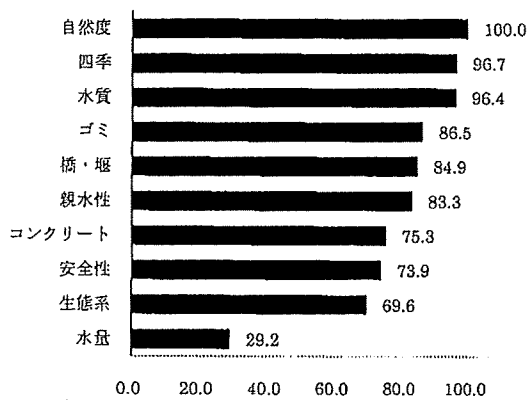


図-4 CART 法の変数重要度

も顕著であった。また、重回帰係数の低かった水質によって分岐されるふしも存在した。

このときの変数重要度を図-4に示す。自然度での重要度が最も高く、次いで四季、水質、ゴミの順で高かった。すなわち、河川に対してポジティブな質問項目に対する重要度が最も高かった。次いで、ネガティブな質問項目が続いた。他方、水量や生物など、川辺からは視覚的に捉えにくい要因に対する重要度は高くなかった。多くの傾向が重回帰解析での結果に類似したもの、重回帰係数の低かった、水質の重要度が比較的高かった。水質は応答だけでなく、ゴミおよび自然度とあいだの正の相関関係が認められた。そのため、重回帰分析では多重共線性が生じた惧れがある。これに対して、CART法では、多重共線性を回避できるため、水質の重要度が増加したと考えられる。このときの寄与率を残差平方和の10重クロスバリデーション推定値に基づいて推定した結果は、 $R_{cv}^2 = 0.479$ であり、重回帰分析を下回った。応答と説

明変数の相関係数より、これらの線形関係の強さが示唆されており、これにより、ステップ関数で近似するCART樹木でのあてはまりが悪かったと考えられる。

(3) MART法の適用

MART法では、損失関数(4.2)として、最小2乗損失、最小絶対損失、Huberの損失関数などが用いられるが、ここでは、他の方法との比較のため最小2乗損失を用いた。MART法は、ステージワイス戦略のなかで、複数の樹木を構成し(アンサンブル学習させていき)、その加法形によってモデルを推定する。図-5にブースティング回数と最小2乗損失のプロットを示す。ここでは、損失関数の交差確認推定量と学習標本での損失関数の推定値を示す。学習標本では、ブースティング回数を増加させるほど損失が減少する傾向にある。これに対して交差確認推定量

は、あるブースティング回数からは飽和傾向を示した。交差確認推定量の結果、本データにおける最適ブースティング回数は549回であることが示唆された。このときの変数重要度のプロットを図-6に示す。CART樹木と同様に自然度の重要度が最も高く、次いで四季、水質、ゴミの順で変数重要度が高かった。すなわち、ポジティブ・イメージの要因の影響が最も高く、ネガティブ・イメージの要因がそれに続く傾向にあった。これは、MART樹木のステージワイス戦略では、最初の樹木(1回目のブースティング樹木)の変数重要度の影響が最も強いためであると推察される。しかしながら、MART法の変数重要度は自然度、および四季の変数重要度の高さが際立っていた。このときの寄与率をCART法と同様の流儀で計算したところ、 $R_{cv}^2 = 0.655$ と最も高い値を示し

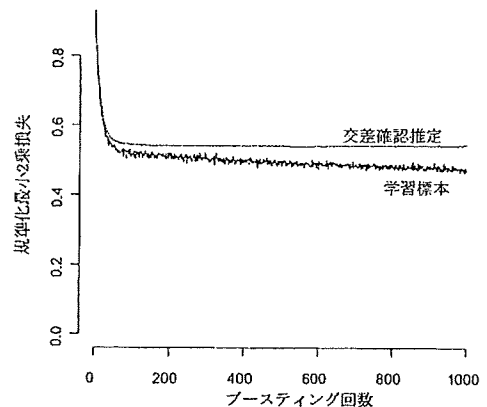


図-5 ブースティング回数と規準化2乗損失のプロット

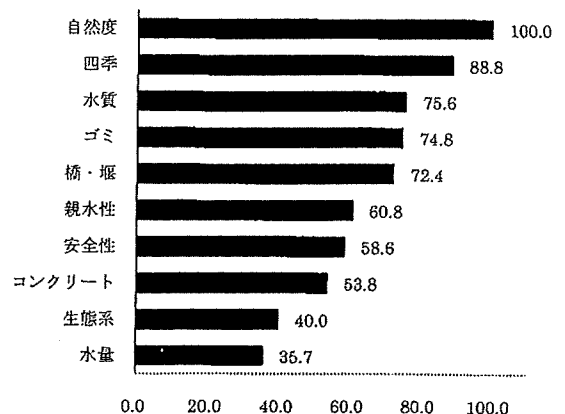


図-6 MART 法の変数重要度

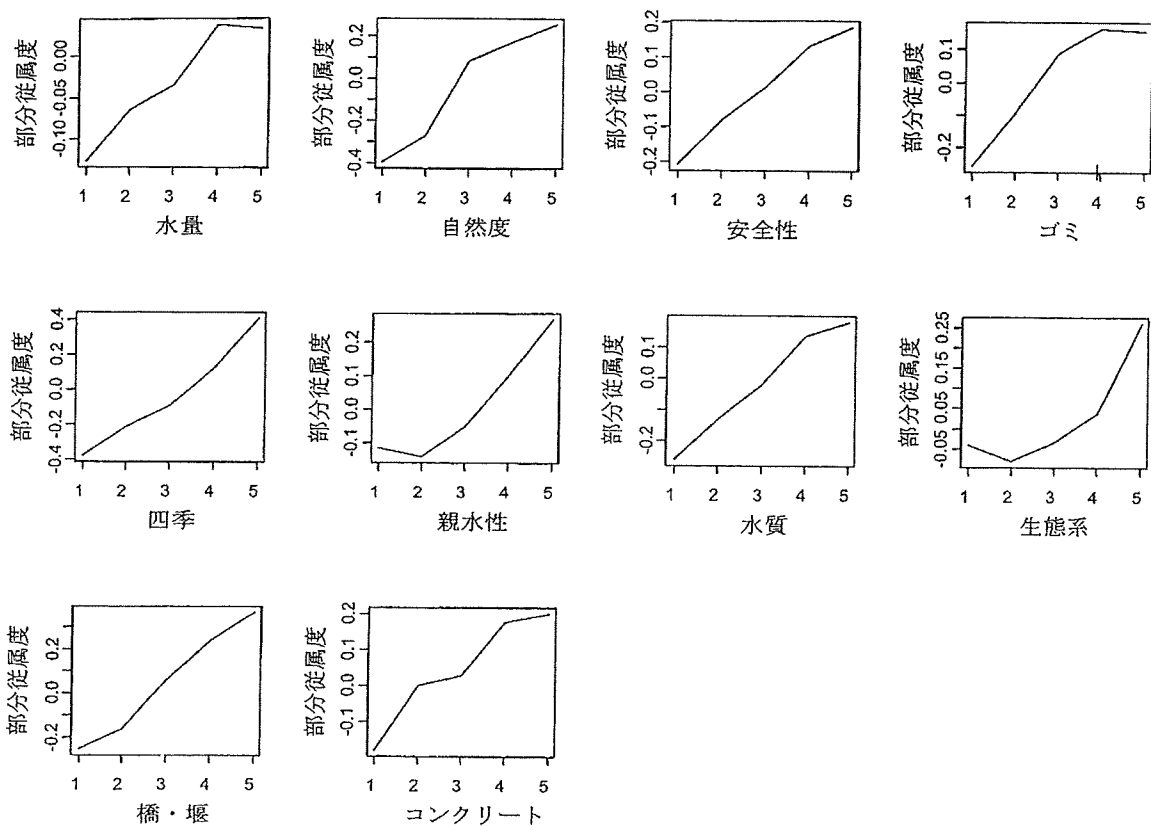


図-7 MART法に対する1次部分従属度プロット

(1:不満である, 2:やや不満である, 3:どちらでもない, 4:やや満足である, 5:満足である)

た。すなわち、寄与率の最も低かったCART樹木をアンサンブルさせることで、大幅に寄与率を上昇させることができた。

次いで、部分従属度を省察することで、各要因が応答に与える影響を評価した(図-7)。四季、自然度、安全性といった要因は、おおよそ直線傾向を示していることから、線形構造をもつことが示唆された。水質、ゴミ、水量は「満足している」と「やや満足している」でほぼ影響には変化がなかったものの、「どちらでもない」から減少傾向を示した。さらに、生態系では、「満足している」と答えた被験者以外にはほぼ影響がなかった。これらの要因は非線形傾向を示しており、重回帰分析ではこれらの傾向を捉えることができなかった。

すなわち、CART法およびMART法では、水質での相対的重要度が高いという結果が得られたが、重回帰分析では水質の回帰係数が低く、応答に対する影響の低さが示唆された。これは、重回帰分析では、交互作用効果を自動的に取り込むことができなかったためであると推察される。

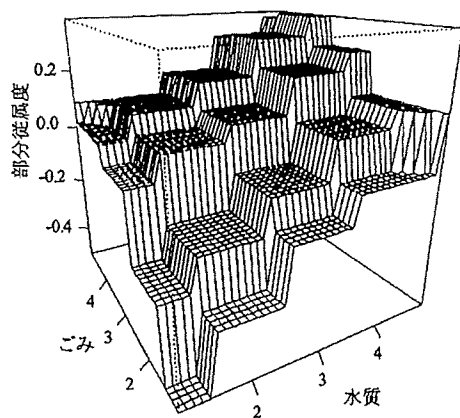
表-1では、水質とごみのあいだに高い相関関係が示唆

された。そのため、ごみと水質の河川景観満足度に対する2次交互作用を省察するために、これらの2次部分従属プロットを描いた(図-8(a))。その結果、2次交互作用が示唆される傾向を得ることができなかった。すなわち、これらの変数間での交互作用はみられなかった。

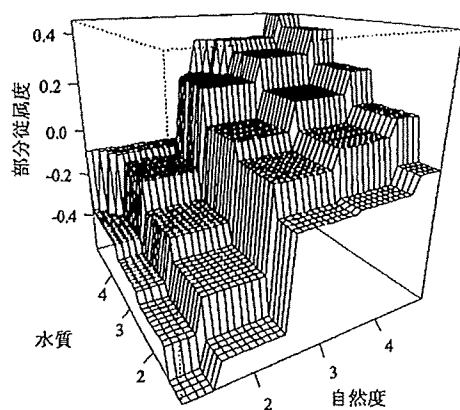
水質と自然度の相関係数も高かった。また、CART法の結果(図-3)では、自然度と水質の交互作用が示唆された。水質と自然度の2次部分従属プロットを図-8(b)に示す。自然度が「不満である」と答えた被験者は、水質に「満足している」と答えた場合でも、部分従属度が殆ど上がることはなかった。これに対して、自然度が「どちらでもない」以上の満足度もつ被験者では部分従属度は、急激に上昇し、水質に対して満足度が高くなるにつれ、その傾向が顕著だった。したがって、水質は自然度に不満をもつ被験者には殆ど影響がなく、自然度に満足している被験者にとっては、その影響が顕著だった。

(4) 結果の要約

3種類の方法によって河川景観満足度を解析した。ここでは、MART法が他の手法に比して有用だった点に注



(a) 水質・ごみの部分従属プロット



(b) 水質・自然度の部分従属プロット

図-8 MART 法に対する2次部分従属プロット

目しながら要約する。

相対的重要度のプロットより、自然度、すなわち河川周辺の環境が河川そのものの満足度にも強い影響を与えることがわかった。このことは、四季の変化、および堰・橋の変数重要度が高かったことから推察できる。また、自然度、あるいは四季といったポジティブな要因のほうが、ゴミあるいは水質といったネガティブな要因よりも河川景観満足度に影響を与えることが示唆された。河川のゴミの有無はその満足度に強い影響を及ぼすものの、水量や生物など、川辺からは捉えにくい変数の重要度は高くなかった。

重回帰分析では、交互作用効果を自動的に抽出できないため、MART法の部分従属プロットで示唆された水質と自然度による交互作用効果を適切に捉えられなかった。他方、MART法およびその部分従属度プロットでは、この交互作用効果に関する有用な示唆を与えることができた。すなわち、自然度に不満がある場合には、水質が河川の満足度に殆ど影響しないことがわかった。

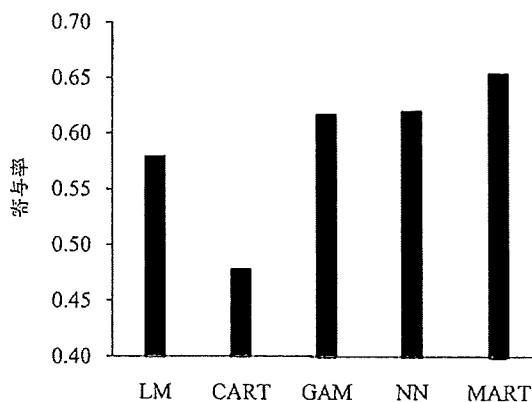


図-9 諸種の回帰手法に対する寄与率

(LM:重回帰分析, CART:分類回帰樹木法, GAM:一般化加法モデル, NN:ニューラルネット, MART:多重加法型回帰樹木)

応答に対して線形関係をもつ数個の説明変数(安全性、水質、四季)が示唆された。そのため、CART法の寄与率が最も低かった。しかしながら、MART法では、CART樹木をアンサンブルさせることにより、その欠点を補うことに成功した。

MARTのモデル適合度を示すために、諸種の回帰手法とMART法の性能を寄与率で比較した結果を図-9に示す。ここではMART法の対照手法として、重回帰分析、一般化加法モデル、ニューラルネット、CART法を用いた。その結果、CART法が最も低い適合度を示した。一般化加法モデルおよびニューラルネットではニューラルネットの方が僅かに良好な適合を示したが、MART法はニューラルネットを上回る適合性能を示した。ニューラルネットでは、モデルの非線形構造を捉える事ができるものの、高次の交互作用を捉えることができない。これに対して、MART法では、回帰器に樹木を用いることで、この問題に対処することができる。このことがモデル適合の好さに反映されたと考えられる。

すなわち、MART法では、非線形構造や交互作用効果に関する多くの知見が得られるだけでなく、高いモデル適合度も得られた。

5. 結び

本研究では、河川の満足度に影響を与える要因をアンケート調査の結果に基づいて探索した。アンケート調査の分析には、通常、重回帰分析が用いられるが、これらの要因が単純な線形結合によって結びついていることはなく、要因間の交互作用構造、あるいは応答と要因のあいだの非線形構造を含むことは少なくない。ただし、これらの構造を捉えることは困難である。

本論文では、予測精度と結果の解釈の両方を満たすこ

とができる, 多重加法型回帰樹木法(MART法)をアンケート調査の分析に応用し, その有用性を既存の回帰分析手法と比較した. その結果, 水質と自然度のあいだに内在する交互作用構造を部分従属プロットにより捉えることができ, そして個々の要因の結果との線形/非線形関係をグラフィカルに提示できた. さらに, MART法は応答に対する説明変数の影響の大きさを変数重要度で評価できる. その結果, 河川景観満足度にポジティブな要因(自然度, 四季)のほうがネガティブな要因(ゴミ, 水質)よりも影響度が高いことが示された.

謝辞: 本研究の資料調査において(株)ワード研究所の大島章嘉氏には多大なご協力を頂いた. 厚く謝意を表する.

参考文献

- 1) Witten, I.H., Frank, E.: *Data Mining: Practical Machine Learning Tools And Techniques*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2005
- 2) 河川景観の形成と保全の考え方検討委員会編: 河川景観デザイン, (財)リバーフロント整備センター, 2007
- 3) 建設省中国地方建設局太田川工事事務所: 河川構造物の景観デザインマニュアル(案), 1990
- 4) 島谷幸広 編著: 河川風景デザイン, 山海堂, 1994
- 5) 小路剛志, 藤田光一: 景観評価指標を用いた都市河川の景観分析, 土木計画学研究講演集, vol.32, 269, 2005
- 6) 杉本知之, 下川敏雄, 後藤昌司: 樹木構造接近法と最近の発展, 計算機統計学, No.18, pp.123-164, 2005
- 7) 土木学会編: 水辺の景観設計, 技報堂出版, 1988
- 8) Hastie, T., Tibshirani, R.: *Generalized Additive Models*, Chapman & Halls, London, 1990
- 9) Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J.H.: *The Elements of Statistical Learning: Data mining, inference and prediction*, Springer, New York, 2001
- 10) Friedman, J.H.: Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of Statistics*, Vol.29, pp.1189-1232, 2001
- 11) Breiman, L.: Bagging procedure, *Machine Learning* Vol. 26, pp.123-140, 1996
- 12) Breiman, L.: Using adaptive bagging to debias regression, *Technical Report 547, Statistics Dept. UCB*, 1999
- 13) Breiman, L.: Random Forests, *Machine Learning*, 45, 5-32, 2001.
- 14) Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., Stone, C.J.: *Classification and Regression Trees*. CRC Press, Florida, 1984
- 15) Freund, Y., Schapire, R.E.: Experiment with a new boosting algorithm. *Machine Learning: Proceedings of the Thirteen International Conference*, pp. 148-156
- 16) Ripley, B.D.: *Pattern Recognition and Neural Networks*, Cambridge University Press, London, 1996
- 17) 市民満足学会・(株)ワード研究所: 河川景観満足度調査中間報告書, 2006
- 18) 和田安彦, 道典康治, 和田有朗: 自然環境と河川環境の評価に関する研究, 土木学会論文集G, Vol.63, No.3, pp.168-178, 2007

(2008. 10. 7 受付)

ENSEMBLE LEARNING METHOD FOR THE RIVER SATISFACTORY QUESTIONNAIRE DATA

Toshio SHIMOKAWA, Yukari MUTOH, Taku MISONOU
and Shinichi KITAMURA

In the fields of river landscape study, it is one of important subjects to explore influencing factors on satisfactory of river landscape. The multiple regression analysis is one of the useful statistical tools for exploration of the factors. This multiple regression analysis and related regression analyses (ex. principle regression analysis, partial least square and so on) are usually based on the linear combination of explanatory variables. However, the observations obtained in practice rarely satisfy this constrained model structure. In this paper, we focused on one of the ensemble learning methods, "multiple additive regression tree (MART) method". The performance of MART method was evaluated by the river satisfactory questionnaire data¹⁷⁾. As a result, the MART method gave more prediction performance and provided attractive interpretation than other methods widely used.