

脳低温自動制御システムによる生命保護と予後の確保

動く生死の狭間と患者の願い

これを支える脳圧・麻酔・呼吸の自動管理技術とともに

東京医科歯科大学大学院 若松秀俊

1 何ができるのか？

何年か前のこと、NHKテレビ放送で、医療ジャーナリストの柳田邦男氏を交えて、日本大学医学部救急医療施設で行われている林成之教授の脳低温療法が紹介された。この反響は大きく、多くの人々に交通事故や脳梗塞や心筋梗塞などその他の虚血生脳障害患者の「生への希望と人の生死観」に大きな影響を与えた。柳田邦男氏の令息が交通事故で脳挫傷が原因で亡くなったとのこと、同氏が、この療法を知っていたら「あるいは息子は！」と無念さを述べていたが、まさにそれに同感の思いであった。

いまや、林教授の臨床のたゆまざる研究と努力、臨床上の管理技術と相俟って、精密な体温管理ができれば、かなりの好成績で救命でき、しかも予後にすぐれていることが世の中に示されている。まことに敬服すべき業績である。

我々研究グループは、生体機能を制御する専門講座に属している。これまでに救急時の呼吸や循環の制御を個体差に依存しない、自動制御法によって、炭酸ガスの濃度や酸素濃度の制御を行ってきた。そして「システム制御理論を呼吸・循環・麻酔などの総合管理システムに応用すべく努力し、この成果を生体温度精密制御の自動化手段に拡大、支援するシステムを構築した。この方法は医学的にいっても、積極的に治療に結びつけることができる画期的な方法になり得る。その結果、病人や死に対する考えも当然変化してくるものである。もちろんこれらの開発は林教授の医学的所見を出発点としており、それを側面から支えるものであると同時に、今日の医学のあり方を問うものである。

ところで、医療や介護のあり方は真に受益者の立場から考える必要がある。これまで筆者は同様な考えから遠隔医療とリハビリテーション

に取り組んできたが、これを支える基本技術は医学・計測・コンピュータ・機械・熱工学の総合システムによる操作感・安全性を重視する研究室独自の医用工学技術である。そして、協力技術として電子情報双方向・大容量高速通信ネットワークや実際のコンピュータ支援の遠隔計測の技術による生命維持管理技術である。

この脳低温自動制御システムの特徴は

- 1 精密な温度範囲内の制御
- 2 個体差・環境変化に依らない温度制御
- 3 システム制御による完全な自動温度制御であり、この管理システム技術を用いて
- 4 安定動作の保証による医療管理の簡素化
- 5 異常事態に関する警報システム
- 6 通信回線による遠隔監視
- 7 人的労力と医療費の大幅削減を実現することである。

できるだけ、身体を傷つけず、これらを行う手段・方法は極めて限定される。これを効果的にを行い自動化するのが、本研究の最大の目的である。

脳低温療法

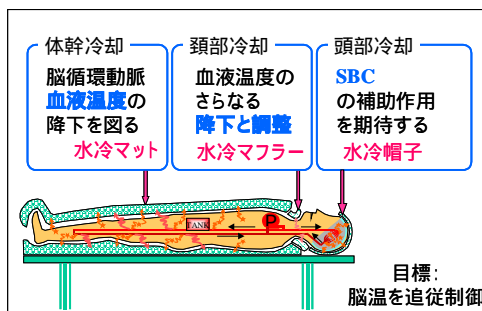


図1.非侵襲脳低温療法

2 なぜこのようなシステムが必要か?

交通事故などで挫傷による重症の脳障害は従来回復不能であり、いずれ脳死に至ると考えられていた。しかしながら、脳を適当な低温にある期間保てば、重度の昏睡状態の患者が再び目覚めて、しかもやがて社会復帰ができる。そんな例が数多く報告されている。この仕事はチーム医療なので医師だけでなく、看護師、薬剤師、臨床検査技師、臨床工学士らが連携しなければならない。そのなかで、医療従事者の意志疎通が極めて重要であり、これらをすべて人が長期間継続的に行うのは困難である。ところで長時間の専門業務への連続就業に関する膨大な労力は医療費に、また労働の質は人の生命とその後の生活の質に重大な影響を与える。不足した機能を補うこと、また人間にとって不都合な仕事を代行するのが工学的技術であるとすれば、そして、それを人工システムによって十分代行できるなら、そうしたシステムを積極的に取り入れて便利になるようにすればよい。しかし、本テーマのような場合には、全体温管理、衛生管理、生理状態管理のシステム化は厳密さもさることながら、長期にわたる連続管理にはどうしても自動計測制御システムが不可欠である。

ところで、医学・生物学で言う個別性は医学では最も特徴的であり重要であるが、この種の問題は多く場合に解決できないのが実状である。もちろん、これを否定するものではないし、医学・生物学の分野でこれがある意味では、事の

本質を言い当てている。しかし、基本的な物理構造と物理法則を同じくする現象は学問的には本質に同一性を備えている。とすれば、個人の年齢や状況が違って、統一的方法、すなわち同じ方法で適応的に自ら働きかけるシステムを変更しながら、対応可能であるような方法が存在するはずである。これが適応制御の本質的思想と方法であり、環境が変化しても、個体の経時変化があっても、操作する時期や場所がちがっても、自動的に臨機応変に制御システムを変えていける方法である。それゆえ、同じ目標値にシステムが自動的に安定的に稼働するように自らを変化させる調節系を備えた制御が可能なシステムが構成できる。これを脳温度調節や後述する他の生体機能調節に積極的に活用する。

不慮の傷害に遭遇したとき、救急時の救命支援システムはもちろんのこと、以後、ハンディが生じないようにできるだけ正常に近い機能に復し、自らの能力を維持する必要がある。したがって、本方法では事故に遭遇して、単なる救命だけではなく、回復後に健常者に近い、動物機能としての生物学的特性を維持することを重視している。すなわち、救急のみならず生活空間を寝たきりにせず、壮年期の健常人に匹敵する患者の社会的活動と経済的自立、患者自らの存在価値、生き甲斐の確認と満足感を保証するような支援システムであることを要する。なぜなら、このことは自己と他との関係において生きる意味の最も重要な点であるからである。しかし、ここでは研究室で開発した技術を総合して、生命維持と予後支援の枠内に限定したシステム構築を前提として考える。

3 どのようなシステムか

脳温度を効果的に下降させるには全体温の定値制御に一気に突入するものではない。林教授が経験的に見出したような、安全で効果的



図2 . 救急救命のようす

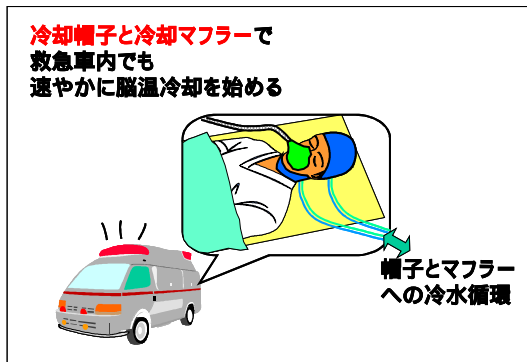


図 3 . 救急車内での速い対応

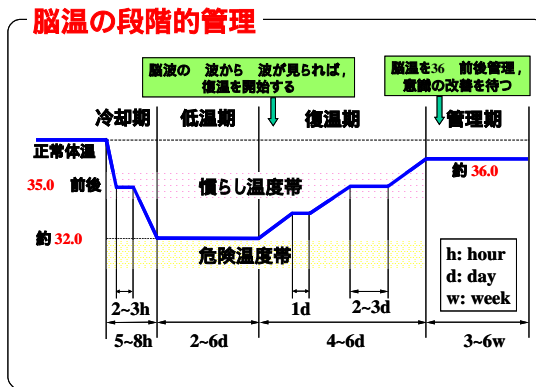


図 5 . 脳温度の低温制御の概念図

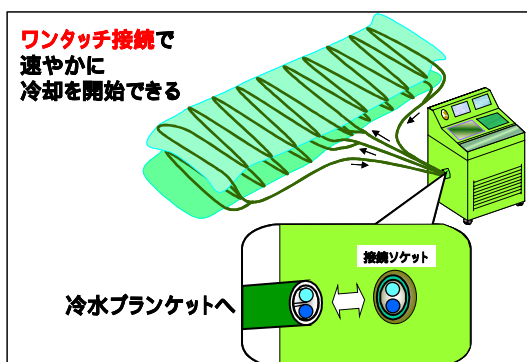


図 4 . 救急治療室内の装置

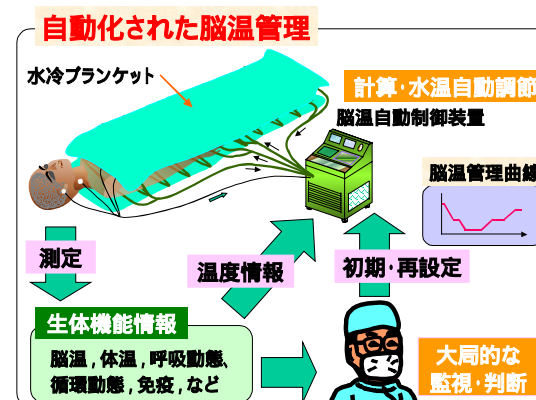


図 6 . システムの仕組み

な目標値に追従させる制御が不可欠である。しかしながら、これを個体差，経時変化，環境変化のある人については所望の制御システムを構成するのが極めて困難である。

ここでは，脳の冷却には冷却帽子が冷却マフラーを用いた熱伝導による方法を併用し，冷却ブランケットによる身体の血液循環を介した温度制御が主たる手段になる。脳温は図 5 に従って経時的に精密に制御する。物理的には熱交換器に相当するので，双線形システムとしての動特性を考える必要があり，システム理論に基づいた制御システムを構成する必要がある。

4 医学的治療の姿

脳低温療法に不可欠な医学的処置は以下のようである。

医師の処置には大きく見て，脳温・全身体温管理，全身麻酔と呼吸の管理，頭蓋内圧管理を挙

げることができる。脳温管理のためには，脳に入る血液温を鼓膜温により測定するか，または内頸静脈洞から頭蓋底に挿入したカテーテルによる脳温度概略測定を行う。脳温度は直接的に脳圧にも関連するので最も注意を払う必要がある。20mmHg以下の脳圧上昇までを正常と考えるが，30mmHgを越える上昇がある場合は脳の毛細血管に血流がなくなり，神経細胞が壊死状態になる。現在、この脳圧制御に関して新しい制御法を提案中である。また，カルシウムイオンの過剰による神経細胞の壊死を避ける必要があるし，血小板減少による血液凝固系の障害防止，また血中カリウム減少による不整脈と心停止の予防が必要である。これらに対して補液，輸液を必要とする。このために，血液の生化学検査が必要である。また，胃洗浄および腸の洗浄，抗生物質投与による腸内細菌による低体温

時の感染防止を行う。低温生体反応として免疫低下は重要で、その限界が32 であり、本システム稼働に最も重要な留意点である。その他、血中電解質濃度のバランスにも配慮する。なお、回復時に施す復温措置ではこの時に起こる震え(シバリング)は筋肉が酸素を消費し、脳への酸素供給が不足になる。これを避けるために筋弛緩剤の投与と回復時のその段階的減量により、自発呼吸を促す必要がある。

5 工学の役割

患者の全身状態、病状を把握しながらの治療はもちろん医療チームの役目である。工学の役割は、人力で行うには労力が大き過ぎる温度管理、麻酔管理、呼吸管理、脳圧管理である。これらに限定して、しかも個体差や環境変化に自動的に対処できる制御システムの構築を目指す。これが適応制御方式で実現できる。具体的には、基本的に以下の医療支援を実現する。

医師の望む時間内で所望の脳の低温化を実現すること。

動脈血炭酸ガス濃度、酸素濃度、酸素飽和度の一定値制御を行うこと。

全身麻酔時の麻酔深度を所望のレベルに制御すること。

脳圧を薬剤を併用して危険範囲外に保つ。これらはシステム制御工学、情報工学、電気機械システムを専門とする我が研究チームで行い得る。

6 研究室の技術レベル

前記の総合的な脳低温維持自動制御システム構築に必要な技術は、すべて研究室で個々に開発した技術の集積によるものである。とくに、人工呼吸制御や麻酔深度制御で確立した適応極配置理論により個体差に関係なく、しかも装置に問題があっても、十分に所望の制御ができるシステムを基礎としている。

自動的脳低温療法の体温管理システム

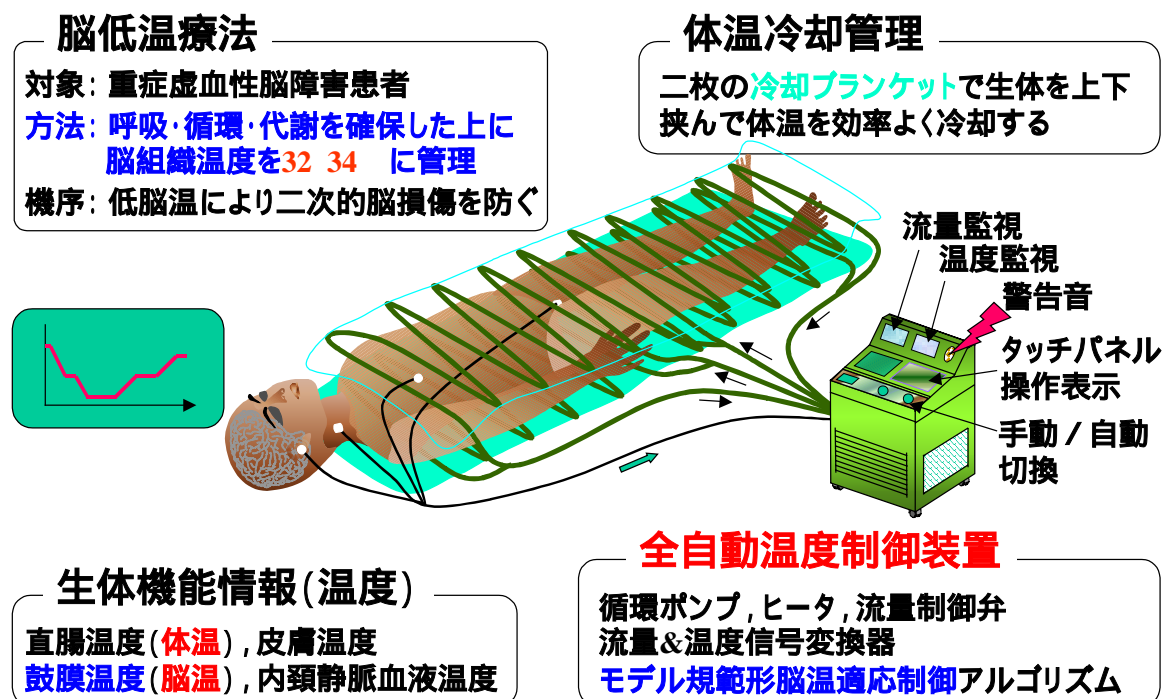


図7. 脳低温療法のための体温管理システム

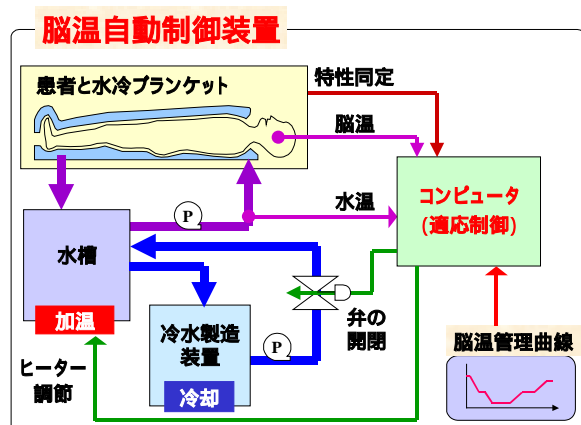


図 8 . 温度制御装置の構成

以下、これまでに実現できた技術および開発中の技術を述べる。

医師の望む時間内で所望の脳温度を実現すること。

水冷ブランケットにより全身冷却を行った。このとき、襟巻きと帽子状の冷却装置の併用により、最適冷却の条件を自動的に選定して、患者の個体差、環境依存しないように脳の温度を所望の狭い適温範囲に保つ自動化システムを

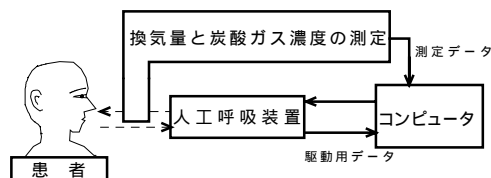


図 9 . 人工呼吸制御システム原理図



図10 . 電子制御装置が組み込まれた本研究室開発の人工呼吸装置の外観

開発したこと。制御のためのシステム構成は前ページの図7に示した。また制御機器のハードウェア構成の詳細を図8に示す。

動脈血炭酸ガス濃度、酸素濃度、酸素飽和度の一定値制御

当該システムの制御には適応制御理論、ファジィ制御理論を適用した。その結果、これまでに、解決不可能であった個々の患者への医学的対処の方法の相違の煩雑さと困難を克服した。

すなわち、患者の個性性に依らない方法でダイナミックな肺胞気炭酸ガス濃度制御を可能にした。このために、システムとしての厳密な数学的記述の不可能な生体の機能を制御する客観的な方法確立した。呼吸調節系の肺胞気炭酸ガス濃度、末梢動脈血酸素飽和度を非侵襲でしかも患者に負担のない換気法により精密に制御する。具体的には自動制御に適したデジタル制御用2-シリンダ型呼吸装置を開発済みであり、その性能を確認している。現在、単独での人工呼吸管理システム実用化に向けて改良を行っている。

全身麻酔時の麻酔深度を所望の深度に制御すること。

麻酔事故の多発とガイドラインの必要性から麻酔レベルを客観的に評価するシステムを開発中である。その評価のポイントとして、深度を監視し、呼吸・循環を通じてこれを客観性のある適応制御による方法を提案している。

具体的には、呼気ガス分析、血液ガス分析、動脈圧、中心静脈圧、心電図、脳電図、筋電図、深部体温、直腸温、尿成分と尿量、胸壁音の状態により麻酔の深度をファジィ理論により総合的に推定し、危険時には警報を発生するシステムである。

また、麻酔薬の混合装置の開発と麻酔事故の起こらないような客観的な麻酔深度の自動制

御を試みている。その際、麻酔の深度を段階的に具体的な数値で記述しこれを麻酔薬、酸素の添加混合による適応極配置制御を行う。

患者生理状態監視

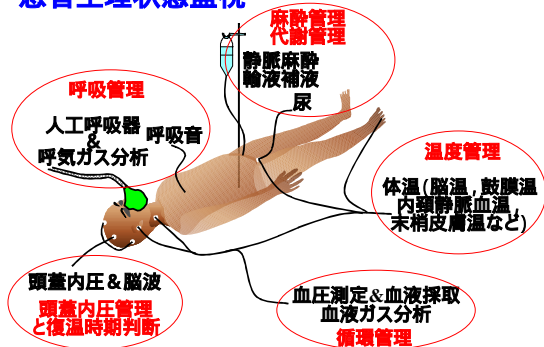


図11. 麻酔時の監視情報

炎症による脳圧亢進の軽減

脳挫傷・脳虚血による炎症は脳圧を亢進し、二次的に脳神経破壊を誘発する。本研究室では、臨床の実際の治療にそって以下にマンニトールなどの薬剤を用いて効率的に脳圧降下を最適制御によって実現する理論的根拠を明確に与えることができた。

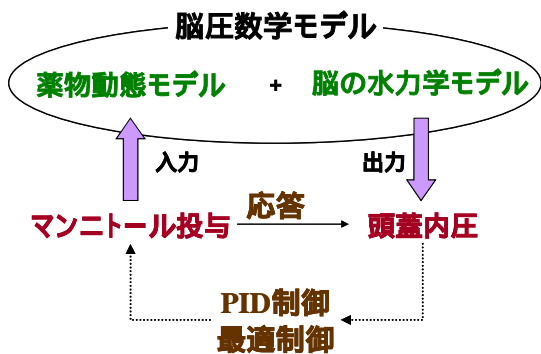


図13. 脳内圧制御のための最適制御システム

7 VR 技術を応用した訓練用システムの開発

脳温度制御は人の生命維持に直接影響するので訓練用システムの開発も重要である。これを開発中である。このために、市販の人形を用いて、内部に必要な器具を埋め込んだ。種々の治療環境条件を変化させた時の制御対象の状態を治療環境

条件と併せて人形とともにその表示を可能にする。このための操作にあたって実時間での特性表現。記録や臨場感を実現するために、詳しい画像変化の忠実再現と高速合成のための処理も考慮した。このようなシステムは本研究室で開発した大容量高速通信ネットワークの双方向通信・遠隔操作技術や臨場感・操作感・安全性に優れた独自のバーチャルリアリティ技術を支柱にしている。

なお、本システムは現実の作業を実行し、訓練・学習ができる環境を整えるものである。すなわち、必要なものだけを人工的に実現し、直接臨床的にも働きかけを可能にする技術であり、システムに操作感・使用感・達成感の喜びと実際的な価値が見出せるものとして開発中である。すなわち、本システムは、煩雑すぎる既存の手順の



図14. 脳低温管理シミュレータ付属人工呼吸器



図15. 脳低温管理シミュレータ付属生理状態判断・警報システム
誤りを避け、現実のものを用いた体験重視に特徴がある訓練システムである。

8 現状と未来への展望

長寿社会における我が国の経済社会の要請と情勢を鑑みて、本研究者らはシステム技術を用いて、総合的な医療支援システムを構築し、その実用運用により、広く世の中に役立てることを目指してきた。そのために、工学的観点だけでなく、社会的有用性や倫理性をより鮮明にした支援システムを構築してきた。

具体的にはこれまで遠隔医療による救急支援システムの開発を行ってきた。また、不慮の傷病に倒れて場合でも知的能力を失うことなく生かすような、文化的、経済的側面からも、患者の社会参加の満足感を享受できる手助けとなる支援システムを開発してきた。それは、自らの社会的存在と重要性の表現や生き甲斐の実感と継続的自己実現が志向できることを、如何なる年齢にあっても必要とすることを前提としており、人生の最後まで保証しようとしたものであった。

一方、ここで取り上げたものは技術協調による総合医療システムとして位置づけられるもので、これまでに行ってきた支援システムから発展したものである。

ところで、ここで扱ったような医療は、これまで脳死に移行するのをただ手を拱いて見ているしか方法がなかった事態にあっても、可能な方法が残されていることを世に実地を通して

周知させたことである。すなわち人の生死の問題を真っ向から考え直す、重要な事実を提供してくれたことであり、その意味で林教授らの功績は筆舌に尽くせないものがある。

その結果、本システムの背景となる医療が生死に新しい分岐点の概念を提供し、そのため生命観も変化し、社会の医学への見方に変革の可能性をもたらした。とくに、救急医療での生命保持と脳死時の臓器摘出の論議では、生死の狭間の定義が不明確になった今、臓器移植問題についてはより一層厳密な議論が必要となってきた。

ところで、本システムはそれ自身の価値とは別に、現在各所で整えられつつある情報通信インフラストラクチャーを最大限活用し、本研究の実施期間は20年に及び、ここで紹介した研究室の技術それ自身は、個々に実用化の可能性をもつ新しい基礎技術であるだけでなく、これらを集約し構築した支援システムの活用は個々の技術のもつ価値を更に高めるものである。なお、医療に役立てようとしたシステム技術のシミュレーション成果から得られる理論医学については種々検討してきたが、これに関する類似の工学的医療の研究は内外で他に見受けられない。