[特別講演 II]

脳損傷の生成機序に関する最近の進歩

藤原 敏 (横浜市立大学 医学部)

Recent Advances in the Study on the
Biomechanics of Brain Injury

Satoshi Fujiwara

ABSTRACT

A cerebral contusion and DAI(diffuse axonal injury) are very important in a medicolegal cases of the closed head injury. In this paper, I will report the epitome of the recent advances in the study on the biomechanics of them. Coup contusion can be mainly attributed to the skull inbending and/or the skull fracture. As to the mechanism of the contrecoup contusion, several theories are reported. They are Holbourn's rotation theory, Gurdjian's theory (anatomical features of the skull), Gross's cavitation theory, Lindenberg's theory (deformation force and acceleration one) and Courville's theory (transmitted of waves of force). As to DAI, Gennarelli's theory (high rate of angular acceleration operating for a long period). As to the brain injuries including a cerebral contusion and DAI, Ommaya's centripetal theory and Willinger's theory (natural frequency of impact) are reported.

Key words: Wounds and injuries, Brain injuries, Cerebral contusion, Diffuse axonal injury

外傷性脳損傷には古くから注目されて来た局在性の脳損傷である脳挫傷と、びまん性脳損傷である脳震盪および同じくびまん性脳損傷であり、最近注目されるようになって来たDAI (diffuse axonal injury) がある。

1. 脳損傷の分類

Graham and Gennarelli¹⁾は脳挫傷を focal brain damageに、DAIを diffuse brain damageに分類している。

Classification of Brain Damage

1. Brain damage in non-missile head injury

1) Focal brain damage

(1) Contusion

(2) Intracranial haematoma

① Extradural haematoma

② Subdural haematoma

③ Intracerebral haematoma

(3) Various types of secondary damage

2) Diffuse brain damage

(1) Diffuse axonal injury

(2) Hypoxic brain damage

(3) Diffuse brain swelling

(4) Diffuse vascular injury

2. Brain damage in missile head injury

2. 脳挫傷, 脳震盪およびDAIの病理

脳挫傷は脳皮質の毛細血管や小動脈周囲の出血を特徴とするものであり、重症例においては脳白質に及ぶ脳実質内出血を生じることもある。さらに、受傷後時間経過につれて壊死巣が形成され、楔状の病巣が形成される。また、脳挫傷には打撃を受けた側に生じるcoup contusionと打撃の反対側に生じるcontrecoup contusionとが区別される。

脳震盪は、スポーツ頭部外傷など比較的軽微な鈍的頭部外傷の際に、脳がびまん性に傷害されることによって受傷直後に発症し、短時間継続する意識障害であり、病理形態学的変化を残さない可逆性の現象である。

DAIは最初にStrich²⁾により脳白質のびまん性変性として病理解剖学的に報告されたもので、脳挫傷と同様に、頭部が衝撃を受けた時に一次性に起るびまん性脳損傷であり、その後Adams et al.³⁾によりdiffuse axonal injury(DAI)と命名された。病理形態学的変化を残す点で脳震盪とは異なり、また意識障害すなわち昏睡が6時間以上継続するものであり、高度のDAIにおいては脳幹部の機能不全を示す臨床症状を伴って、昏睡は24時間以上に及び、時に死に至る場合がある。

DAIは脳白質に起きたびまん性の shearing injuryによって生じる病変であり、形態学的に以下の特徴があると言われている。脳幹の背外側お

よび脳梁の肉眼的病巣として、受傷の初期には小出血巣が認められ、組織学的には組織の希薄化病巣やaxonal retraction ballがみられ、受傷後時間の経過につれて囊胞性病巣となる。また、大脳、小脳ならびに脳幹の白質の軸索へのびまん性損傷として、受傷後数日以内に組織学的に axonal retraction ballが認められ、受傷後数週間後にはこれらは消失し、microgliaの集簇がみられ、さらに長期の生存例においては白質の神経線維束の変性が認められ、数カ月後の生存例では脳梁の菲薄化、白質の萎縮および脳室全体の拡大が認められる。

3. 脳挫傷の好発部位およびDAIを生じ易い外傷

1) 脳挫傷

Gurdjian et al.⁴⁾は、脳挫傷は頭部の打撃部位のいかにかわらず、前頭葉下面、前頭極、側頭葉下面および側頭極に好発すると述べている。

打撃が加えられた頭部の部位別に検討されたものとしては、以下の報告がある。Sano et al.⁵⁾は前頭部打撃の場合には脳の前頭葉や側頭葉にcoup contusionを79%の割合で、後頭部打撃の場合には、前記と同じ部位に contrecoup contusionを83%の割合で、また側頭部打撃の場合には、対側の前頭葉や側頭葉にcontrecoup contusionを50%、同側の同部位にcoup contusionを40%の割合でそれぞれ認めたと述べている。

Kirkpatrick⁶⁾は前頭部打撃においては coup contusionが、側頭部打撃においてはcontrecoup contusionが、また後頭部打撃においては contrecoup contusionが顕著に認められたと述べている。

Lindenberg⁷⁾は静止している頭部に打撃が加えられた場合の脳挫傷では、contrecoup contusionに比べ、coup contusionが強くみられ、一方、転倒あるいは転落の結果、静止している地面などに頭部が衝突した場合には、coup contusionに比べ、contrecoup contusionが高度にみられると述べている。

藤原ら⁸⁾は頭部への打撃の原因および打撃部位別にcoup contusionとcontrecoup contusionとを比較検討して以下の結果を発表している。側頭部打撃の場合、打撲例の88.9%において coup contusionが優位であり、転落例では80.0%において contrecoup contusionが優位、転倒例ではほぼ全例においてcontrecoup contusionのみを認めた。前頭部打撃の場合、打撲の全例において coup contusionのみを認め、転落の11例中8例において coup contusionのみを認め、残り3例においては、

coup contusionとともに一般に脳挫傷発生頻度の低い後頭葉にcontrecoup contusionを認めた。後頭部打撃の場合、打撲の全例においてcoup contusionが優位に認められ、転落例では93.3%の例においてcontrecoup contusionが優位であり、また転倒ではほぼ全例においてcontrecoup contusionのみが認められている。

以上の報告から、一般に打撲例ではcoup contusionが、一方、転落・転倒例ではcontrecoup contusionが顕著に認められるものと考えられる。

最近、打撲例であるにもかかわらずcoup contusionに比べcontrecoup contusionが強く認められた症例の報告が成されている。西村ら⁹⁾は交通事故で大型タンクローリーに頭部を打撃されたものと、作業中に重量600Kgのバッキンで頭部を打撃された打撲の2症例で、いずれの例においてもcontrecoup contusionが強く認められたと報告している。また、Morrison et al.¹⁰⁾は落下した木の枝で頭部を打撃した2例で、いずれの症例でもcontrecoup contusionが強く認められたと報告している。

ところで、西村ら⁹⁾やMorrison et al.¹⁰⁾の報告に関連して、以前にこのことを示唆する実験的研究が既に成されている。Edberg et al.¹¹⁾は頭蓋をプラスチックで作製し、内腔に水を満たした頭部模型を打撲あるいは落下させる実験を行い、この時の頭蓋内圧を測定して以下のような結果を報告している。重量の軽いハンマー(120g)で頭部を打撃した場合には落下の場合と比較して明らかな差異を認めたが、重量の重いハンマー

(2, 100g)の場合には落下実験に似た結果が得られたと報告している。

2) DAI

DAIを生じ易い外傷については以下の報告がある。Adams et al.¹²⁾は外傷の原因として交通事故が46%、転落・転倒事故が43%、頭部への打撲の例が9%をしめていたと報告している。また、Adams et al.³⁾は別の報告でDAIを認めた45例のうち交通事故は33例、転落・転倒事故は5例であったと述べている。Imajo and Roessman¹³⁾はDAIの5症例を報告しており、いずれも交通事故によって死亡したものであった。Blumbergs et al.¹⁴⁾はDAIを認めた34例のうち29例は交通事故によるものであり、4例は転落事故によるものであったと報告している。以上から一般にDAIは交通事故の際の外傷によって発生し易いものと考えられる。

4. 実験的研究

脳挫傷、DAIや脳震盪の生成機序に関してこ

れまで数多くの実験的研究が行われて来ている。

動物実験¹⁾として、サル¹⁵⁾⁻²²⁾、犬²³⁾、rat^{24), 25)}、猫¹⁾、羊²⁶⁾等の動物を使った研究が数多く行われ、また、人間の死体を用いた実験²⁷⁾も実施されている。

人工の頭部モデルを用いた実験として、以下のものがある。Holbourn^{28), 29)}はプラスチック製頭蓋の内腔に脳の代わりにゼラチンを容れた二次元モデルに回転運動を与える実験を、Gurdjian and Lissner³⁰⁾はゼラチンの代わりに頭蓋内腔にmilling yellow(aniline色素)を入れたモデルを用いて実験を行っている。また、ヒト頭蓋やプラスチック製頭蓋の内腔に水を容れたモデルによる実験も多く行われている^{11), 31)-40)}。

最近ではコンピューターを用いてヒト頭部をFEM (Finite Element Method) によってシミュレーション化した実験的研究⁴¹⁾⁻⁴⁸⁾が広く行われるようになって来ている。

5. 脳損傷のBiomechanics

これまでの多くの研究の結果、脳挫傷、DAIや脳震盪の生成機序について、以下のような種々の仮説が発表されている。

1) 脳挫傷

Coup contusionの生成機序に関しては、一般的に以下のように言われている。頭蓋の打撃部位が局所的にinbendし、さらに陥凹あるいは陥没骨折を生じることによって脳表面が直接に損傷を受けるためにできると考えられている⁴⁹⁾。

Contrecoup contusionの生成機序に関しては多くの説が提唱されている。

Holbourn^{28), 29)}は脳のゼラチンモデルを用いた実験から以下のような説を発表している。脳はほぼ半球形であるために、頭部への打撃によって頭蓋内において脳の回転運動が生じ、またこの運動は大脳半球の中心部よりも脳表面に近い部位の方が強く起ることに注目し、以下のように考えた。脳の損傷は脳と頭蓋とがラフあるいはスムーズに接している部分、たとえば頭蓋冠などでは起り難いが、頭蓋底とくに前頭蓋窩や中頭蓋窩のように脳がびっしりと硬い骨に取り囲まれている部位では、回転運動により脳組織に剪断力(shear strain)が働き、そのために脳実質の破壊や脳血管の破綻を来し、脳挫傷を生じるものと考えた。なおこの脳の回転運動は、Pudenz and Shelden²⁰⁾によってサルを使った実験において観察されている。

Gurdjian et al.⁴⁾は前頭葉の眼窩上壁部や前頭葉と側頭葉の接合部に脳挫傷がしばしばみられることに着目して、以下のように考えた。すなわ

ち、頭蓋そのものの解剖学的特徴が重要であり、眼窩上壁に凹凸が多いこと、蝶形骨の小翼が鋭い辺縁を有していること、ならびに、前頭蓋窩と中頭蓋窩の間が棚状に区切られていることにより、頭部打撃の結果、頭蓋内で脳が運動をする際にこの部の脳がこれらの骨構造に強く打ちつけられて容易に脳挫傷を生じるためであると説明している。

Gross³¹⁾は頭部への加速度衝撃が打撃側の頭蓋内に陽圧、対側の頭蓋内に陰圧を生じること注目して以下のように説明している。すなわち、対側に生じた高度の陰圧に基づいてその部にcavityを生じ、ついでこのcavityが崩壊する時に力学的にその部の脳組織や脳血管が破壊されてcontrecoup contusionを生じると説明している。頭部への加速度衝撃に基づいて頭蓋内に圧変化が生じることに関しては、その後の研究^{11), 32)-37), 50)}によっても確かめられている。

Lindenberg^{49), 51)}は以下のような理論的仮説を発表している。頭部打撲時には打撃側では頭蓋の陥凹によって生じる陽圧である deformation pressureと頭部運動時の頭蓋と脳との運動の差によって生じる同じく陽圧である acceleration pressureの両者の合併によりcoup contusionを生じ、一方、対側では、打撃側の頭蓋の陥凹に基づき脳実質の打撃方向へのずれを来し、そのために生じた陽圧の deformation pressure と陰圧の acceleration pressureとが互いに打ち消し合うことによりcontrecoup contusionを生じ難い。しかし、転倒して頭部に打撃を受ける場合には、打撃側では陽圧の deformation pressureと陰圧の acceleration pressureとが互いに打ち消し合うので、coup contusionを生ぜず、一方、対側では陽圧の deformation pressureと陽圧の acceleration pressureが発生し、この両者の合併によりcontrecoup contusionを生じる。

Courville⁵²⁾は、頭部打撃によって打撃部位の脳内に生じた力の波が脳実質内を伝わり、この力の波の伝播方向にあたる対側の脳実質が頭蓋内面に強く打ちつけられてcontrecoup contusionが生じると説明している。

2) DAIおよび脳震盪

脳震盪の生成機序に関して、Denny-Brown and Russell¹⁵⁾はサルを使って頭部に加速度衝撃を与える打撃実験を行い、頭部が固定されている場合には脳震盪は発生し難く、一方、頭部が自由に運動し得る状態にある場合には発生し易いことから、頭部の加速度運動がこの生成に関わる重要な因子であると考えている。

Holbourn^{28), 29)}は脳が頭蓋内で回転運動を起すことによって脳内にshear strainが生じ、これ

に基づいて脳挫傷が生じるという仮説を発表しているが、この説に注目した Ommaya and Gennarelli¹⁶⁾ は線形加速度は脳震盪を生じないが、頸椎の低い位置を回転中心とする角加速度は容易にこれを生ぜしめると報告している。

その後、この角加速度に注目した実験が Gennarelli et al.^{17), 18)} によってサルを用いて行われた。最初の実験では、頭部への角加速度を中程度の強さにすることによって一過性の脳震盪が発生した。そこで、より高度の脳震盪を発生させるために、さらに強い角加速度衝撃を与えたところ、硬膜下出血のためにサルは死亡し、より高度の脳震盪を発生させることはできなかった。次に角加速度の作用時間、すなわち持続時間を長くした実験を行ったところ、硬膜下出血は発生せず、高度の脳震盪を起すことに成功し、さらには DAI を初めて実験的に発生させることができたことと報告している。彼らの脳震盪に関する研究の成果によって、脳震盪ならびに DAI のいずれも頭部への角加速度衝撃によって生じるものであり、DAI は脳震盪に比べて頭部への衝撃がより高度で、また衝撃の持続時間が長い場合に発生することが証明された。

3) 脳挫傷, DAI および脳震盪を一括して脳損傷とした場合

Ommaya⁵³⁾ は centripetal theory of concussive brain injury を提唱している。頭部が回転運動を起す際、頭蓋はこの動きに遅れることなく運動するが、脳は慣性のためその動きに遅れを生じ、またこの遅れは深部の脳ほど顕著なものとなる。そのため脳の各部位に shear strain を生じ、これは脳の表面から中脳や間脳等の中心部の脳へ向かうほど高度なものとなる。とくに、材質的あるいは構造的に大きな変化（たとえば、硬膜、血管構造および蝶形骨の小・大翼などの骨隆起や凹凸）の存在する部位ではとくに strain が顕著なものとなる。彼はこの strain の求心性伝播によってびまん性の脳損傷が生じると説明している。また、この説によると、concussive brain injury の症状や予後、脳挫傷、脳出血および DAI の発生部位、とくに脳挫傷が前頭葉や側頭葉領域に好発すること、さらに DAI が左右方向の衝撃によって発生し易いことの全てを明確に説明できると述べている。

Willinger et al.⁵⁴⁾ は脳損傷の生成機序として、頭部への衝撃が作用する時間（衝撃の持続時間）、すなわち衝撃の周波数スペクトルの最大値（maximum value of frequency spectrum of impact）が重要な因子であるという非常に独創的な考えを提唱し、以下のように説明している。頭

部へ加えられた衝撃の固有振動数が 150Hz 以下の持続時間の長い衝撃である場合（soft impact, 柔らかい物体による打撃）、脳の辺縁部は頭蓋と一緒に運動するが、この脳の動きはその中心部に向かうにつれて遅れを生じ、そのために脳の深部に shear strain を生じ、DAI などのびまん性脳損傷を生じ、これは特に脳の中心部において顕著である。一方、固有振動数が 100~800Hz の持続時間の短い衝撃である場合（hard impact, 硬い物体による打撃）、脳と頭蓋との間に相対的な運動が起り、そのため脳皮質や脳の辺縁部に局在性の脳挫傷を生じ、これは前頭蓋窩や中頭蓋窩に面する脳の下面においてとくに顕著となる。

参考文献

- 1) Graham, D. I. and Gennarelli, T. H.: Trauma. In Greenfield's Neuropathology 6th ed. (Eds. Graham, D. I. and Lantos, P. L.), pp197-262, Arnold (1997).
- 2) Strich, S. J.: Diffuse degeneration of the cerebral white matter in severe dementia following head injury. J Neurol Neurosurg Psychiatr, 19, 163-185, 1956.
- 3) Adams, J. H., Graham, D. I., Murray, L. S. and Scott, G.: Diffuse axonal injury due to non-missile head injury in humans: An analysis of 45 cases. Ann Neurol, 12, 557-563, 1982.
- 4) Gurdjian, E. S., Lissner, H. R., Hodgson, V. R. and Patrick, L. M.: Mechanism of head injury. Clin Neurosurg, 12, 112-128, 1966.
- 5) Sano, K., Nakamura, N., Hirakawa, K., Masuzawa, H., Hashizume, K., Hayashi, T. and Fujii, S.: Mechanism and dynamics of closed head injuries. Neurol Medicochir, 9, 21-33, 1967.
- 6) Kirkpatrick, J. B.: Head-in-motion contusion in young adults. Acta Neurochirurgica, Suppl, 32, 115-117, 1983.
- 7) Lindenberg, R. and Freytag, E.: The mechanism of cerebral contusion - A pathologic-anatomic study. AMA Arch Path, 69, 440-469, 1960.
- 8) 藤原敏, 柳田泰義, 福永龍繁, 溝井泰彦, 龍野嘉紹: 打撲, 転落および転倒死例にみられる脳挫傷の解析. 日法医誌, 40, 377-383, 1986.
- 9) 西村明儒, 主田英之, 牛山郁子, 山本好男, KOZMA Zsolt, 西克治: 重量物による頭部打撃例. 日法医誌, 51(2), 149, 1997.
- 10) Morrison, A. L., King, T. M., Korell, M. A.,

- Smialek, J. E. and Troncoso, J. C. : Acceleration-Deceleration Injuries to the Brain in Blunt Force Trauma. *Am J Forensic Med Pathol*, 19(2), 109-112, 1998.
- 11)Edberg, S., Rieker, J. and Angrist, A. : Study of impact pressure and acceleration in plastic skull models. *Lab Invest*, 12, 1305-1311, 1963.
- 12)Adams, J.H., Mitchell, D.E., Graham, D.I. and Doyle, D. : Diffuse brain damage of immediate impact type. Its relationship to 'primary brainstem damage' in head injury. *Brain*, 100, 489-502, 1977.
- 13)Imajo, T. and Roessman, U. : Diffuse axonal injury. *Am J Forensic Med Pathol*, 5, 217-222, 1984.
- 14)Blumbergs, P.C., Jones, N.R. and North, J.B. : Diffuse axonal injury in head trauma. *J Neurol Neurosurg Psychiat*, 52, 838-841, 1989.
- 15)Denny-Brown, J.P. and Russell, W.R. : Experimental cerebral concussion. *Brain*, 64, 93-164, 1941.
- 16)Ommaya, A.K. and Gennarelli, T.A. : Cerebral concussion and traumatic unconsciousness: Correlation of experimental and clinical observations on blunt head injuries. *Brain*, 97, 633-654, 1974.
- 17)Gennarelli, T.A. : Head injury in man and experimental animals-clinical aspects. *Acta Neurochirurgica*, Suppl, 32, 1-13, 1983.
- 18)Gennarelli, T.A., Thibault, L.E., Adams, J.H., Graham, D.I., Thompson, C.J. and Marcincin, R.P. : Diffuse axonal injury and traumatic coma in the primate. *Ann Neurol*, 12, 564-574, 1982.
- 19)Shelden, C.H., Pudenz, R.H., Restarski, J.S. and Craig, W.M. : The lucite calvarium - A method for direct observation of the brain. I. The surgical and lucite processing techniques. *J Neurosurg*, 1, 67-75, 1944.
- 20)Pudenz, R.H. and Shelden, C.H. : The lucite calvarium - A method for direct observation of the brain. II. Cranial trauma and brain movement. *J Neurosurg*, 3, 487-505, 1946.
- 21)Ommaya, A.K., Boretos, J.W. and Beile, E. E. : The lexan calvarium: An improved methods for direct observation of the brain. *J Neurosurg*, 30, 25-29, 1969.
- 22)Gosch, H.H., Gooding, E. and Schneider, R.C. : The lexan calvarium for the study of cerebral responses to acute trauma. *J Trauma*, 10, 370-376, 1970.
- 23)Gurdjian, E.S., Lissner, H.R., Latimer, F.R., Haddad, B.F. and Webster, J.E. : Quantitative determination of acceleration and intracranial pressure in experimental head injury. Preliminary report. *Neurology*, 3, 417-423, 1953.
- 24)Marmarou, A., Foda, M.A.A.E., Brink, W., Campbell, J., Kita, H. and Demetriadou, K. : A new model of diffuse brain injury in rats. Part I: Pathophysiology and biomechanics. *J Neurosurg*, 80, 291-300, 1994.
- 25)Foda, M.A.A.E. and Marmarou, A. : A new model of diffuse brain injury in rats. Part II: Morphological characterization. *J Neurosurg*, 80, 301-313, 1994.
- 26)Anderson, R.W.G., Brown, C.J., Scott, G., Blumbergs, P.C., Finnie, J.W., McLean, A.J. and Jones, N.R. : Biomechanics of a sheep model of axonal injury. *Proc of INTERNATIONAL IRCOBI CONFERENCE ON THE BIOMECHANICS OF IMPACT*, 181-192, 1997.
- 27)Lissner, H.R., Lebow, M. and Evance, F. G. : Experimental studies on the relation between acceleration and intracranial pressure change in man. *Surg Gynec Obstet*, 111, 329-338, 1960.
- 28)Holbourn, A.H.S. : Mechanics of head injuries. *Lancet*, 2, 438-441, 1943.
- 29)Holbourn, A.H.S. : The mechanics of brain injuries. *British Medical Bulletin*, 3, 147-149, 1945.
- 30)Gurdjian, E.S. and Lissner, H.R. : Photoelastic confirmation of the presence of shear strains at the craniospinal junction in closed head injury. *J Neurosurg*, 18, 58-60, 1961.
- 31)Gross, A.G. : A new theory on the dynamics of brain concussion and brain injury. *J Neurosurg*, 15, 548-561, 1958.
- 32)Thomas, L.M., Roberts, V.L. and Gurdjian, E.S. : Impact-induced pressure gradients along three orthogonal axes in the human skull. *J Neurosurg*, 26, 316-321, 1967.
- 33)Kenner, V.H. and Goldsmith, W. : Impact on a simple physical model of the head. *J Biomechanics*, 6, 1-11, 1973.

- 34)藤原敏, 柳田泰義, 溝井泰彦, 龍野嘉紹, 中西孝一: 転倒および打撲時における頭蓋内圧変動—頭頸模型を用いた実験—. 日法医誌, 40, 323-334, 1986.
- 35)藤原敏, 柳田泰義, 溝井泰彦, 福永龍繁, 上野易弘, 今林篤治: 頭部への打撃により生じる頭蓋内圧変化の成因—頭頸模型を用いた実験的証明—. 日法医誌, 41, 263-269, 1987.
- 36)Yanagida, Y., Fujiwara, S. and Mizoi, Y.: Differences in the intracranial pressure caused by a 'blow' and/or a 'fall'— An experimental study using physical models of the head and neck. Forensic Sci Int, 41, 135-145, 1989.
- 37)Fujiwara, S., Yanagida, Y. and Mizoi, Y.: Impact-induced intracranial pressure caused by an accelerated motion of the head or by skull deformation; an experimental study using physical models of the head and neck, and ones of the skull. Forensic Sci Int, 43, 159-169, 1989.
- 38)Fujiwara, S., Yosuke, S., Morishita, J., Teratsuji, E., Shimada, M., Aihara, H., Inamura, K., Watanabe, Y. and Hirabayashi, M.: An experimental study on the acceleration of the head colliding with the automobile. In CURRENT TOPICS IN FORENSIC SCIENCE VOLUME 3(Eds. Takatori, T. and Takatsu, A.) pp.310-313, Shunderson Communications (1997).
- 39)Fujiwara, S., Yosuke, S., Morishita, J., Teratsuji, E., Watanabe, Y., Hirabayashi, M., Shimada, M., Aihara, H. and Inamura, K.: Reduced acceleration of the head wearing a helmet; An experimental study using a physical model of the head. In ADVANCES IN LEGAL MEDICINE 3 (Ed. Wakasugi, C.) pp.420-423, Yoyodo Printing Kaisha Ltd. (1997).
- 40)Fujiwara, S., Ogawa, Y., Watanabe, Y., Hirabayashi, M., Inamura, K. and Aihara, H.: Biomechanics of Cerebral Contusion and Diffuse Axonal Injury. Proc of the 6th Indo Pacific Congress on Legal Medicine and Forensic Sciences(Ed. Tatsuno, Y.) pp.1003-1006, Organizing Committee of the 6th Indo Pacific Congress on Legal Medicine and Forensic Sciences (1999).
- 41)Hosey, R.R. and Liu, Y.K.: A Homeomorphic Finite Element Model of the Human Head and Neck. In Finite Elements in Biomechanics (Eds. Gallagher, R.H., Simon, B.R., Johnson, P.C. and Gross, J.F.), pp379-401, JOHN WILEY & SONS (1982).
- 42)Chu, C.S., Lin, M.S., Huang, H.M. and Lee, M.C.: Finite element analysis of cerebral contusion. J Biomechanics, 27(2), 187-194, 1994.
- 43)King, A.I., Ruan, J.S., Zhou, C., Hardy, W.N. and Khalil, T.B.: Recent Advances in Biomechanics of Brain Injury Research: A Review. J Neurotrauma, 12(4), 651-658, 1995.
- 44)西本哲也, 村天成之, 菅野宗和: 回転衝撃下における脳の応力分布. 日本機械学会論文集, 62, 147-153, 1996.
- 45)平成7年度自動車の安全性向上に関する研究補助事業報告書. 財団法人 日本自動車研究所, 平成8年3月.
- 46)平成8年度自動車の安全性向上に関する研究補助事業報告書. 財団法人 日本自動車研究所, 平成9年3月.
- 47)西本哲也, 村天成之: 意識障害と脳の衝撃応力集中との関係. 日本機械学会論文集, 63, 81-88, 1997.
- 48)Nishimoto, T. and Murakami, S.: Relation between diffuse axonal injury and internal head structures on blunt impact. J Biomechanical Engineering, 120, 140-147, 1998.
- 49)Lindenberg, R.: Trauma of meninges and brain. In Pathology of the Nervous system (Ed. Minckler, J.), pp1705-1765, Mc Graw-Hill Book Company(1971).
- 50)Gurdjian, E.S.: Recent advances in the study of the mechanism of impact injury of the head - A summary. Clin Neurosurg, 19, 1-42, 1972.
- 51)Lindenberg, R.: Mechanical injuries of brain and meninges. In Medicolegal investigation of death(Eds. Spitz, W.U. and Fisher, R.S.), pp447-456, Charles C Thomas, Springfield Illinois (1973).
- 52)Courville, C.B.: Coup-contrecoup mechanism of craniocerebral injuries. Arch Surg, 45, 19-43, 1942.
- 53)Ommaya, A.K.: Head injury control: Past, present and future. Proc of International conf on Traffic Safety, pp17-24, 1991.
- 54)Willinger, R., Kopp, C.M. and Cesari, D.: Cerebral motion and head tolerance. Proc of the 35th conf of the Association for the Advancement of Automotive Medicine, pp387-404, 1991.