



Title	Compu-Formerを用いたTBI用三次元補償フィルターの作成と臨床的研究
Author(s)	富士原, 将之; 上紺屋, 憲彦; 坪井, 慶太 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 2003, 63(8), p. 399-404
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/18331
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Compu-Formerを用いたTBI用三次元補償フィルターの作成と臨床的研究

富士原将之¹⁾ 上紺屋憲彦¹⁾ 坪井 慶太¹⁾ 入江 美和²⁾
三澤 真人³⁾ 原 宏³⁾ 甲斐 俊朗⁴⁾ 中尾 宣夫¹⁾

1) 兵庫医科大学放射線医学教室 2) 宝塚市立病院放射線科
3) 兵庫医科大学総合内科学教室 4) 兵庫医科大学輸血部

New Three-dimensional Compensating Filter for TBI using Compu-Former Associated with RT LAN

Masayuki Fujiwara¹⁾, Norihiko Kamikonya¹⁾, Keita Tsuboi¹⁾, Miwa Irie²⁾, Mahito Misawa³⁾, Hiroshi Hara³⁾, Syunrou Kai⁴⁾ and Norio Nakao¹⁾

To shorten the TBI process, we developed a new device for making the three-dimensional (3D) compensating filter that improves dose distribution. The dose distributions in the phantom and manufacturing time were compared between the new device and the previous one. Clinical evaluations included dose distribution in patients and the clinical rate of interstitial pneumonitis (IP).

Our 3D compensating filter is made of polystyrene resin and gypsum. The filter was made after performing two procedures as follows. Patient data were measured by CT, and the 3D dose-distribution data and 3D compensating-filter data were obtained from the CT data by the 3D radiation planning system.

We were able to produce the new 3D compensating filter within about 4 hours, including all procedures. The average dose distribution to each site when the 3D compensating filter was used was 92.7% to the head, 102.1% to the thorax, 106.4% to the pelvis, 90.2% to the knee, and 93.8% to the ankle joint, when the scheduled dose was taken as 100%. Dose distribution was improved.

IP occurred in 6 of 32 patients (18.8%). There was no significant difference between the TBI and non-TBI groups in the frequency of IP ($p = 0.27$).

Research Code No.: 601

Key words: Total body irradiation, Hematologic malignancies, Hematopoietic stem cell transplantation

Received Apr. 24, 2003; revision accepted Jul. 3, 2003

- 1) Department of Radiology, Hyogo College of Medicine
- 2) Department of Radiology, Takarazuka Municipal Hospital
- 3) Department of Internal Medicine, Hyogo College of Medicine
- 4) Department of Transfusion Medicine, Hyogo College of Medicine

別刷請求先
〒663-8501 西宮市武庫川町1-1
兵庫医科大学放射線医学教室
富士原 将之

緒 言

現在、白血病をはじめとする血液悪性疾患に対する造血幹細胞移植治療の前処置として、白血病細胞根絶と強い免疫抑制作用を目的とした全身放射線治療 (Total Body Irradiation: TBI) が広く行われている。TBIの照射法については、全身への均等な照射を行うための方法や総線量、線量率、分割回数について施設によってさまざまな工夫がなされている¹⁾⁻¹⁹⁾。これまで筆者らの施設では、TBI時の患者吸収線量の均一化を目的とし、鉛¹⁾やアクリルピース²⁾を用いた三次元補償フィルターを患者ごとに作成しTBIを行ってきた。今回筆者らは、さらなる線量の均一化と、同時に近年のTBI症例の増加に対応するため、フィルター作成の労力の軽減と時間短縮を目的として、フィルター作成機 (Compu-Former; Huestis, USA) と金属含有石膏ジブサムを用いた三次元補償フィルター作成システムを構築した。筆者らの三次元補償フィルターは短時間に作成可能で、TBI時の線量分布の均一性を確保し、肺障害についても安全性が確認できたので報告する。

対象と方法

1. 対象

対象は1998年2月から2002年9月までに兵庫医科大学病院放射線科で血液悪性疾患に対する造血幹細胞移植の前処置としてTBIを行った73例で、男性41例、女性32例である。年齢は5歳～54歳、中央値30歳である。疾患の内訳は、急性骨髄性白血病22例、急性リンパ性白血病20例、慢性骨髄性白血病14例、骨髄異形成症候群11例、悪性リンパ腫6例である。

経過観察期間は1カ月～53カ月 (中央値20.1カ月) であった (Table 1)。

2. 基礎的検討

① TBI治療計画と三次元補償フィルターデータの作成方法
TBI治療計画は患者のCTデータより行っている。CTは仰臥位で下肢を屈曲させ、同部に三角台を設置し体位を保持

Table 1 Patient characteristics

Age; median (y/o)	30
range	5-54
Sex (male/Female)	41/32
Disease	
ALL	22
AML	20
CML	14
MDS	11
ML	6
Follow-up; median (month)	20.1
range	1-53
	n=73

ALL: acute lymphoblastic leukemia, AML: acute myelocytic leukemia, CML: chronic myelocytic leukemia, MDS: myelodysplastic syndrome, ML: malignant lymphoma

し、全身をスライス厚10mmで撮影、得られた画像データを三次元治療計画装置 (Focus; CMS, Japan) に転送し、TBI治療計画および三次元補償フィルターデータを作成した。

② 三次元補償フィルターの作成方法

三次元治療計画装置で作成されたフィルターデータをCompu-Formerに転送し、Compu-Formerにて樹脂製ブロックを2mmピッチで掘削し、鋳型を作成。完成した鋳型に金属含有石膏ジブサムを満たし、フィルターを完成させた (Fig. 1A~E)。金属含有石膏ジブサムは、水と混和しセメント状にし、鋳型に満たした後、パイプレーターで振動させ、気泡を除去し内部を均一化した。

③ ファントムによる線量評価

TBI臨床使用に先立ち、本三次元補償フィルターと、これまで筆者らが使用してきた鉛フィルター、およびアクリルフィルターとの線量の均一性について、人体ファントムを用い比較検討した。人体ファントムの頭部、胸部、骨盤部にファーナー型チェンバー (PTW, Germany) を埋め込み、実際の全身照射と同様に照射し、100 cGy照射時の吸収線量を測定し、線量分布の均一性を評価した。

④ 照射方法

TBIはCT撮影時と同一体位にて、Linac (LMR-4C: 東芝) 4MV X線を用い、左右2門照射で行った。線源体軸間距離350cm、照射口は32×32 cmで対角線の水平ビームで、コリメーターを45度回転し、照射口に完成した三次元補償フィルターを固定した。線源と三次元補償フィルターの距離は53.5 cmである。さらに眼球保護のため鉛ブロックを患者側に設置し遮蔽を行った (Fig. 2, 3)。

吸収線量は体軸中心で1日1回300 cGy、線量率6~7 cGy/分で計1200 cGy、4日間を標準とした。

3. 臨床的検討

① TBI患者の線量評価

TBI照射中、患者の頭部、胸部、骨盤部、膝部、足関節の

射入線量と射出線量をおのおの体表面に設置した半導体検出器 (DPD-510 Scanditronix, Sweden) にて測定し、その平均値を中心線量として評価した (Fig. 4)。

② 肺障害評価

TBI後の合併症のうち、間質性肺炎について評価した。対象患者は73例のうち6カ月以上経過観察し得た32例 (TBI群) で、その発症要因について検討した。TBI群32例の内訳は、男性16例、女性16例、年齢は5歳~52歳 (中央値30歳) である。また、同時期に当院内科で血液悪性疾患と診断され、前処置としてTBIを行わずに造血幹細胞移植を行った症例のうち、6カ月以上経過観察し得た15例を対照群 (非TBI群) として、肺障害についてTBIの関与を比較検討した。

尚、間質性肺炎の診断は、胸部単純X線写真、胸部CT、臨床症状、喀痰検査、末梢血液中cytomegalovirus (CMV) 抗体スクリーニングとモノクローナル抗体を用いた白血球内の抗原検査にて行った。また、肺障害の発生要因として年齢、性別、胸部体厚、肺線量についても検討し、統計解析には χ^2 検定を用いた。

結 果

1. 基礎的検討

① 三次元補償フィルターの作成と設置

三次元補償フィルターの作成に要した時間は、治療計画のためのCT撮影を含めて、約4時間であった。また、照射室内での補償フィルター設置時間は、患者入室から治療開始まで、線量測定用の半導体センサー設置も含めて約10分であった。

② ファントムによる線量評価

本三次元補償フィルターでの測定結果は体軸中心を100%として、頭部95%、胸部98%、骨盤部99%であった。同様に鉛フィルターでは頭部94%、頸部104%、胸部99%、旧アクリルフィルターでは頭部93%、頸部97%、胸部99%、骨盤部98%であり、本三次元補償フィルターでも鉛フィルターおよびアクリルフィルターと同等の線量分布の均一性が得られた (Table 2)。

2. 臨床的検討

① TBI患者の線量評価

TBI患者73例の実測結果は、予定線量1200 cGyを100%として、頭部92.7% (1112.1±132.3 cGy)、胸部102.1% (1225.1±130.3 cGy)、骨盤部106.4% (1277.2±91.1 cGy)、膝部90.2% (1082.6±113.4 cGy)、足関節部93.8% (1126.0±202.7 cGy)であった。一方、アクリルフィルターでは頭部82.9% (995.3±58.6 cGy)、胸部96.7% (1160.5±97.2 cGy)、骨盤部97.2% (1166.5±85.2 cGy)、膝部97.8% (1178.2±75.8 cGy)であった (Table 3)。

② 肺障害評価

本三次元補償フィルターを使用したTBIは73例全例で問題なく施行でき、完遂率は100%であった。また、対象症例

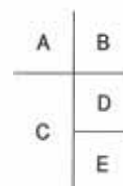
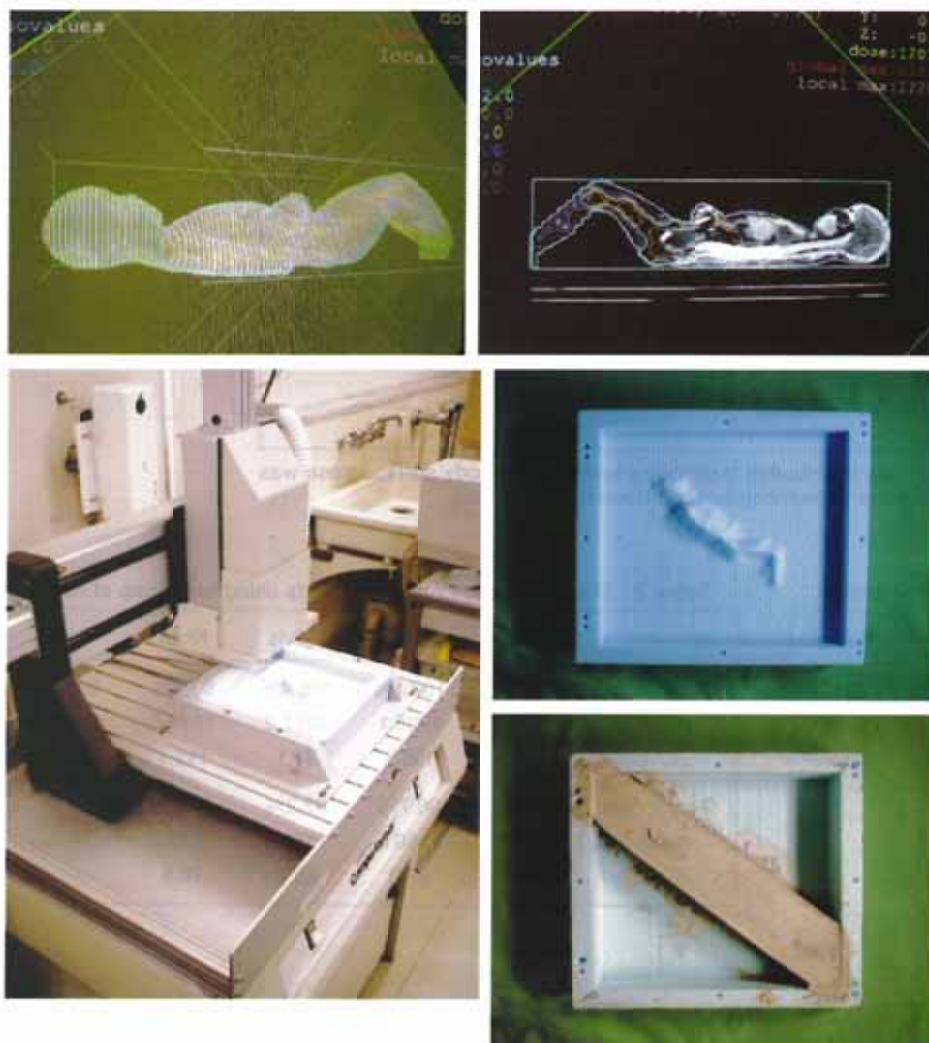


Fig. 1 Process of making the 3D compensating filter.
 A, B : Treatment plan with the 3D treatment-planning system.
 C, D : The block made of resin is shaved with Compu-former and the mold is prepared.
 E : The mold is filled with gypsum, and the 3D compensating filter is completed.



Fig. 2 Setting the 3D compensating filter : The 3D compensating filter was fixed in the gantry.

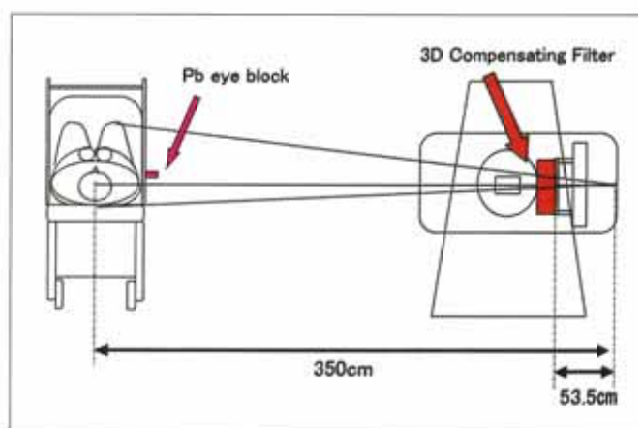


Fig. 3 TBI set-up geometry : SAD was 350 cm from the gantry, and the distance from the gantry to the 3D compensating filter was 53.5 cm.

の2年生存率は、68%であった。

TBI後、間質性肺炎と診断された症例は、経過観察し得た32例中6例(18.8%)であった。間質性肺炎の原因として、6例のうち4例はCMV感染に起因する間質性肺炎と診断された。間質性肺炎の発症時期は、TBI後76日~720日(中央

値176日)であった。間質性肺炎と診断され、CMV感染を否定された2例のうち、放射線性肺臓炎と診断されたのは1例で、TBI後720日に診断された。間質性肺炎の発症症例について、患者の胸部体厚、肺吸収線量、年齢、性別について発症率との関連を多変量解析したが、いずれも有意差を

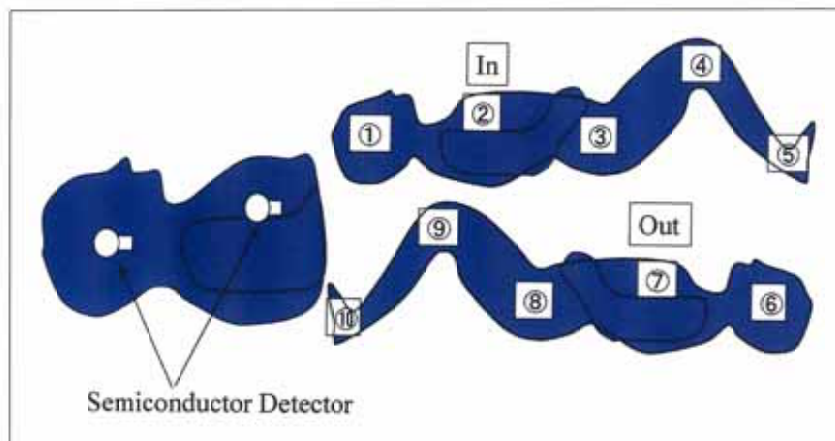


Fig. 4 TBI direct dose distribution monitoring system: The body surface dose was measured using 5 pairs of semiconductor detectors (in and out).

Table 2 Dose evaluation of the human phantom

	Head	Neck	Thorax	Pelvis
3D filter	95%		98%	99%
Acrylic filter	93%	97%	99%	98%
Pb filter	94%	104%	99%	

Table 3 The actual dose of several parts using two types of filters

	Head	Thorax	Pelvis	Knee	Foot
3D filter	92.7%	102.1%	106.4%	90.2%	93.8%
mean (cGy)	1112.1	1225.1	1277.2	1082.6	1126.0
SD (cGy)	132.3	130.3	91.1	113.4	202.7
Acrylic filter	82.9%	96.7%	97.2%	97.8%	
mean (cGy)	995.3	1160.5	1166.5	1178.2	
SD (cGy)	58.6	97.2	85.2	75.8	

認めなかった (Table 4)。また、間質性肺炎発症が認められた 6 例の胸部吸収線量は 1243.2 ± 95.5 cGy で全患者群の胸部吸収線量と有意差は認めなかった ($p = 0.83$)。

一方、非 TBI 群では 15 例中 1 例に間質性肺炎を認めた。この症例は特発性間質性肺炎と診断された。TBI 群で間質性肺炎の発症率に有意な上昇は認めなかった ($p = 0.27$)。

考 察

1. 三次元補償フィルターの作成と設置

近年、造血幹細胞移植の前処置として TBI が広く行われ、さらに非破壊的骨髄移植 (ミニ移植)²⁰⁾ など適応の拡大に伴い、TBI 施行症例数は増加している。また TBI 時の線量分布均一化、あるいは肺補正のための補償フィルターの素材として、さまざまな素材を使用した報告がなされている^{21), 22)}。著者らはこれまで鉛¹⁾ やアクリルピース²⁾ を使用してきたが、旧アクリルフィルター作成に要する時間は約 8 時間で、最近の症例数の増加に対し、対応が困難になっていた。本システムにより作成時間 4 時間と大幅に短縮でき、有用性が高い。

金属含有石膏ジブサムはアルミニウム (Al)、コバルト (Co)、クロム (Cr)、銅 (Cu)、ニッケル (Ni)、マグネシウム (Mg)、ケイ素 (Si)、モリブデン (Mo)、タングステン (W)、バナジウム (V)、リン (P) を含有する粉末状の物質で、水と

混和することでセメント状となり、複雑なフィルターの形状の構築にすぐれる。これまで放射線治療時の固定具²³⁾ や線量減弱のための補正具²⁴⁾⁻²⁶⁾ としての報告があるが、TBI 用の三次元補償フィルターとして使用した報告はない。また、すべての工程のデータは LAN (Local Area Network) システムで自動的に転送が可能で、フィルター作成に要する労力も大幅に軽減できた。さらにフィルターの設置も照射口にボルトで固定する方式で極めて簡便であり、設置に要する労力も軽減できた。

本三次元補償フィルター作成システムにより、症例数増加に対応可能と考える。

2. 線量の均一性

ファントムでの測定結果では、各部と線束中心との誤差 $\pm 5\%$ 以内で、線量の均一性は確保できたと考える。しかし、臨床例での実測線量の平均値では予定線量により近い線量で均一性は改善されたが、標準偏差は大きく、個体間でのばらつきが大きかった。

この第一の原因としてセットアップにおける拡大率による誤差が考えられる。すなわち、線源体軸中心間距離は 350 cm で本三次元補償フィルターでの線源フィルター間距離は 53.5 cm で拡大率は約 6.5 倍であるのに対し、アクリルフィルターでは線源フィルター間距離は 170 cm で拡大率は 2 倍であり、拡大率の差によってフィルター部分でのわずかな誤

Table 4 Radiation Pneumonitis: analysis in terms of the occurrence factor

	No. of patient	Pneumonitis	p-value
Body thickness			
≤ 455.1 mm	16	4	0.36
> 455.1 mm	16	2	
Lung dose			
≤ 1205.9 cGy	16	3	1
> 1205.9 cGy	16	3	
Age			
≤ 30	16	3	1
> 30	16	3	
Sex			
male	16	4	0.46
female	16	2	
TBI			
+	32	6	0.27
-	15	1	

差が患者部分では大きな誤差となる可能性が考えられる。第二にCT位置決め時とTBI時における患者体位の再現性の問題が考えられる。著者らの施設ではTBI照射用寝台にクリーンベッドを使用しているが、CT検査台とは硬度が異なることが、患者体位再現性に誤差が生じる原因となると推測される。第三に、線束内線量平坦度を上げるためのビーム平坦化フィルターを使用しなかったことによる線束の辺縁部での誤差が考えられる。ビーム平坦化フィルターを設置しなかった理由は、射出口に本三次元補償フィルターを設置するので、ビーム平坦化フィルターを設置できないためであったが、ファントム実験においてビーム平坦化フィルターなしで一定のビーム平坦度を維持できていることを確認している。

今後、拡大率を小さくすることで一層誤差を小さくし、線量分布の更なる改善が期待できると考えるが、これについてはフィルターサイズを大きくすることとなり、フィルター作成精度、作成工程の検討が必要と考える。さらにCT撮影時とTBI時の患者体位の再現性を固定具などにより高める必要がある。現在、当院ではTBI使用可能な装置は4 MV X線のみであり、線量分布に関しては6 MVないしそれ以上が有効と考える。また、患者データ採取のCTをMDCTなどにより、さらに詳細なデータ採取を行うことも有用であると考える。

3. 肺障害と安全性

今回の検討では線量分布に一定の均一性を確保されたものの、患者間の胸部吸収線量にばらつきが大きく、肺障害、特に間質性肺炎の発症数増加が危惧された。しかし、今回間質性肺炎発症が認められた6例の胸部吸収線量は全患者群の胸部吸収線量と有意差は認めなかった($p = 0.83$)。また、間質性肺炎発症率でも非TBI群との比較で有意差を認

めなかった。

間質性肺炎は造血幹細胞移植後の主要な死因の1つであり、致死率は高い^{8), 27)-29)}。TBIのdose limiting factorは肺毒性であり、肺遮蔽により肺線量を抑制する報告^{3)-10), 22), 30)}がなされている。しかし、TBI後の間質性肺炎の原因は、CMV感染によるものが大半を占め^{15)-17), 28)}、真菌感染やGVHDの関与も報告されている^{17), 29), 31)}。

造血幹細胞移植後の移植片対宿主病(graft versus host disease: GVHD)や免疫抑制剤の影響については、その要因が多岐にわたるため、今回の評価から除外した。今回の検討では、感染に起因するもの以外の間質性肺炎発症率は6.3% (2/32)で、非TBI群の6.7% (1/15)と有意差を認めなかった($p = 0.95$)。著者らは、Jensenらの白血病細胞の分布が明らかでないため線量分布は全身へ均一照射するべきであるという報告¹⁰⁾と、これまでのアクリルフィルターを使用し現在と同じスケジュールで照射を行い肺障害の発症率に影響が認められなかった経験²⁾に基づき、著者らの施設では肺線量抑制目的の肺遮蔽を行っていない。

TBI後の肺障害の発症に関しては、総線量、線量率、分割回数が関与し、肺線量は10 Gyまでであれば間質性肺炎発症との関連がないとされている³²⁾⁻³⁴⁾。著者らの経験では旧アクリルフィルター使用時のTBIは、肺線量が10.1 Gy~12.9 Gyであったが、肺障害発症に影響を及ぼさなかった²⁾。本三次元補償フィルター使用時のTBIは、肺線量が1225.1±130.3 cGyであるが、間質性肺炎発症率に影響を及ぼさなかったことから、本三次元補償フィルターを使用した総線量1200 cGyのTBIは十分容認できるものと考えられる。

さらに、線量率による肺障害について、渡辺は線量率10 cGy/分以上で間質性肺炎頻度が上昇すると報告し²⁸⁾、Brixらは、線量率6 cGy/分以上は高い危険因子であると報告している³²⁾。またVolpeらは線量率4 cGy以上で8~10 Gy照射、肺線量7~9 Gyで30~40%の致死肺障害発生率が確認され、また低線量率では2.5 cGy/分で8%、3 cGy/分で20%と致死肺障害の発生率は低下すると報告している³³⁾。今回の検討ではTBIによる間質性肺炎の発症率の有意な上昇は認められず、線量率6~7 cGy/分での照射は間質性肺炎発症に影響ないと考えられる。

結 語

73例のTBI症例に対し、均一な線量分布を期待し、Compu-Formerと三次元治療計画装置を用いた三次元補償フィルター作成システムを構築し、TBIを行った。

本システムにより、線量分布の均一性を確保しつつ、三次元補償フィルター作成にかかる時間、労力を大幅に軽減短縮し、TBI症例増加に対応可能となった。

TBI後の間質性肺炎は32例中6例に認められたが、うち4例はCMV感染に起因するものであり、非TBI群と比較して間質性肺炎発症率に有意差は認めず、安全にTBIを施行できた。

今後、さらに線量分布の均一化をはかることが必要と考え、新たな方法を検討中である。

本研究に際し、終始ご協力、ご助言を頂いた総合内科学教室、

放射線医学教室の諸氏、ならびに中央放射線部の放射線技師諸氏に厚く御礼申し上げます。

本論文の要旨の一部は、国際放射線腫瘍学会(2001年2月、メルボルン)において発表した。

文 献

- 1) 栗栖孝一：骨髄移植の前処置としての全身照射法に関する基礎的ならびに臨床的研究。日本医放会誌 51：799-809, 1991
- 2) 坪井慶太, 上紺屋憲彦, 和泉正幸, 他：全身照射用三次元補償フィルターの作成と基礎的臨床的研究。日本医放会誌 59：782-787, 1999
- 3) Umek B, Zwitter M, Habic H: Total body irradiation with transplantation method. *Radiother Oncol* 38: 253-255, 1996
- 4) Christ G, Schmidt H, Nusslin F, et al: TBI technique and clinical results of leukemia patients at the University of Tubingen. *Radiother Oncol* 1: 98-101, 1990
- 5) Quast U: Total body irradiation—review of treatment techniques in Europe. *Radiother Oncol* 9: 91-106, 1987
- 6) Peters LJ, Withes HR, Cundiff JH, et al: Radiobiological Considerations in the Use of Total-Body Irradiation for Bone-Marrow Transplantation, *Radiology* 131: 243-247, 1979
- 7) Breneman JC, Elson HR, Little R, et al: A technique for delivery of total body irradiation for bone marrow transplantation in adults and adolescents. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 18: 1233-1236, 1990
- 8) Miralbell R, Rouzaud M, Grob E, et al: Can a total body irradiation technique be fast and reproducible? *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 29: 1167-1173, 1994
- 9) Bradley J, Reft C, Goldman S, et al: High-energy total body irradiation as preparation for bone marrow transplantation in leukemia patients: treatment technique and related complications. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 40: 391-396, 1998
- 10) Jensen JM, Brix F, Kohr P: General and specific aspects of experimental dose measurement in total body irradiation (TBI). *Strahlenther Onkol* 162: 250-253, 1986
- 11) Bieri S, Helg C, Chapuis B, et al: Total body irradiation before allogeneic bone marrow transplantation: Is more dose is better? *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 49: 1071-1077, 2001
- 12) 安河内浩, 東 静香, 奥畑好孝, 他：全身照射の方法。日本医放会誌 48：906-910, 1988
- 13) McAfee SL, Powell SN, Colby C, et al: Dose escalated total body irradiation and autologous stem cell transplantation for refractory hematologic malignancy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 53: 151-156, 2002
- 14) Malicki J: Doses in critical organs during total body irradiation before bone marrow transplantation. *Annals of Transplantation* 3: 14-19, 1998
- 15) Gerrard GE, Vail A, Taylor RE, et al: Toxicity and dosimetry of fractionated total body irradiation prior to allogeneic bone marrow transplantation using a straightforward radiotherapy technique. *Clin Oncol* 10: 379-383, 1998
- 16) Szekely J, Fabry L, Fargacs G, et al: total body irradiation before bone marrow transplantation. *Strahlenther onkol*. 175: 606-610, 1999
- 17) Belkacemi Y, Pene F, Touboul E, et al: Total-body irradiation before bone marrow transplantation for acute leukemia in first or second complete remission. *Strahlenther Onkol* 174: 92-104, 1998
- 18) Clift RA, Buckner CD, Appelbaum FR, et al: Allogeneic marrow transplantation in patients with chronic myeloid leukemia in the chronic phase: A randomized trial of two irradiation regimens. *Blood* 77: 1660-1665, 1991
- 19) Clift RA, Buckner CD, Appelbaum FR, et al: Allogeneic marrow transplantation in patients with acute myeloid leukemia in first remission: A randomized trial of two irradiation regimens. *Blood* 76: 1867-1871, 1990
- 20) 安部康信, 原 敬一, 崔日承, 他：骨髄非破壊的前処置(TBI: 200cGy)を用いて同種末梢血幹細胞移植を施行した55歳の急性リンパ性白血病。臨床血液 41：1277-1280, 2000
- 21) 井上俊彦：白血病に対する骨髄移植療法と全身照射法の国内の現状。日放技師会誌 44：765-772, 1988
- 22) Danato V, Iacari V, Zurlo A, et al: Fractionated total body irradiation in allogeneic bone marrow transplantation in leukemia patients: analysis of prognostic factors and results in 136 patients. *Radiother Oncol* 48: 267-276, 1998
- 23) Mellenberg DE: Dose behind various immobilization and beam-modifying devices. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 32: 1193-1197, 1995
- 24) Weeks KJ, Arora VR, Leopold KA, et al: Clinical use of a concomitant boost technique using a gypsum compensator. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 30: 693-698, 1994
- 25) Arora VR, Weeks KJ: Characterization of gypsum attenuators for radiotherapy dose modification. *Med Phys* 21: 77-81, 1994
- 26) Weeks KJ, Fraass BA, Hutchins KM: Gypsum mixtures for compensator construction. *Med Phys* 15: 410-414, 1988
- 27) 岡田昌也, 武元良整：同種骨髄移植後のサイトメガロウイルス感染の監視。日本臨床 56：189-192, 1998
- 28) 渡辺浩：非リンパ性造血器腫瘍に対する同種骨髄移植におけるブスルファン, サイクロフォスファミド, 全身照射併用前処置法の検討。慈恵医大誌 111：841-856, 1996
- 29) 星野充明, 畠 清彦, 三室 淳, 他：骨髄移植後に難治性気胸を合併した間質性肺炎の1例。臨床血液 34：718-722, 1993
- 30) Kim TH, Rybka WB, Lehnert S, et al: Interstitial pneumonitis following total body irradiation for bone marrow transplantation using different dose rates. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 11: 1285-1291, 1985
- 31) Thomas O, Mahe M, Campion L, et al: Long-term complications of total body irradiation in adults. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 49: 125-131, 2001
- 32) Brix F, Duhmke E: Result and side-effects of total body irradiation before bone marrow transplantation using the Kiel compensating method. *Strahlenther Onkol* 163: 226-227, 1987
- 33) Velpe AD, Ferrari AJM, Annaloro C, et al: Lethal pulmonary complication significantly correlate with individually assessed mean lung dose in patients with hematologic malignancies treated with total body irradiation. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 52: 483-488, 2002
- 34) Appelbaum FR, Thomas ED: Treatment of acute leukemia in adults with chemoradiotherapy and bone marrow transplantation. *Cancer* 55: 2202-2209, 1985