中学校結核集団感染の環境要因に関する検討

豊田　誠

要旨：〔目的〕建築物の環境が結核集団感染におよぼす影響を検討する。〔対象と方法〕中学校で発生した集団感染の接触者718人を対象に，初発患者との接触状況別に感染率を比較した。6フッ化硫黄をトレーサーガスとして用い，教室の換気状況を測定した。〔結果〕接触者から34人の結核患者が発見され，155人に予防内服が指示された。同クラス生徒での感染率は90.0%であり，初発患者と直接接触のないグループからも11人の発病があった。校舎の窓はアルミサッシで閉めきられており，教室の換気回数は1.6～1.8回/hrと少なかった。教室の引き戸を開けた状態では，教室と廊下のガス濃度は急速に攪拌された。〔考察〕初発患者がHighly Infectious Caseであったことに，過密して換気の少ない教室の環境が重なり，同クラス生徒の高い感染率につながった。間接的な接触者にも感染が拡大した要因としては，初発患者が時間割によって3年校舎の1，2階の共用教室を使っていたことや，感染性飛沫核が休み時間中に廊下に拡散し，初発患者の教室が3年校舎の入り口に位置したため，3年校舎に出入りする者の動線と交わったことが考えられた。

キーワーズ：結核集団感染，中学校，建築物，環境要因，換気，6フッ化硫黄

はじめに

1980年代頃から，わが国でも結核集団感染の報告が多くなりはじめ，最近では年間40～50件の集団感染が報告されている[1]。

集団感染の発生要因としてRaffalli[2]は，①多数の未感染者がいること，②排菌陽性者の存在，③過密あるいは換気不全，④長時間の接触，⑤診断の遅れが共通して存在していることを指摘している。青木[3]はさらに環境面の問題として，アルミサッシの普及にみられる建築物の気密性の向上が，集団感染の増加を招いている可能性を指摘している。

大規模な結核集団感染事例が起こった高知市の中学校[4]で，教室の利用状況別の感染率，発病率を比較するとともに，教室の換気環境を実験で把握することにより，建築物の環境が結核集団感染におよぼす影響を検討したので報告する。

対象と方法

1999年1月28日に，高知市内の中学3年1組の女子生徒がb II 2, ガフキー6号の肺結核として発見された。発見までの咳の自覚期間は2カ月間であったが，咳の程度は激しく，咳のある間も授業は休まずに出席していた。

3年校舎の教室の共用状況を，Table 1に示した。初発患者は3年1組だけでなく，3年2組，音楽室，美術室，被服室を利用しており，これらの教室は3年生を中心に，1年生も使用していた。理科室については，単元により全学年が利用している可能性があった。接触者718人を対象に，教室，校舎の利用状況別に，初発患者の登録56カ月後までの患者数ならびに予防内服指示者数を比較検討した。

発見時の3年生校舎の見取り図を，Fig. 1に示した。環境測定は，2003年2月3日の午前中に実施した。3年校舎の1階の教室では，旧3-1教室が資料室となっており，戸棚やパーテーションが設置され1999年当時と

高知県幡多保健所

連絡先：豊田　誠，高知県幡多保健所，〒787-0028 高知県中村市山手通19 (E-mail: makoto_toyota@ken4.pref.kochi.jp)
(Received 13 Aug. 2003/Accepted 3 Oct. 2003)

Table 1 Users of common rooms

Room	Users
3−1	Male students of 3−1 and 3−2 in health education
3−2	Female students of 3−1 and 3−2 in health education
Music room	Students of all 3rd grade class and all 1st grade class
Art room	Students of all 3rd grade class, 1−3, 1−4 and 1−5
Homemaking room	Students of all 3rd grade class
Science room I & II	Occasionally students of all 3rd, 2nd and 1st grade class

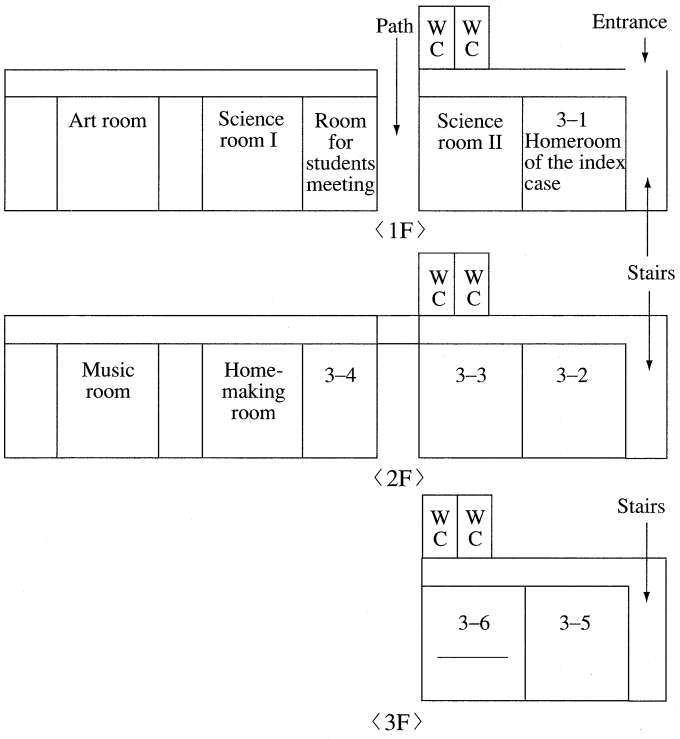

Fig. 1 Diagram of the school building for the 3rd grade students

室内環境が変わっていた。そこで，旧3−1教室と同じ構造の旧第2理科室（測定時点はT-T教室として利用）と廊下で実施した。

測定機器は，ガスモニタリングシステムとしてB＆K7620，マルチガスモニターとしてINNOVA1312，マルチサンプラー・ドーザーとしてB＆K1303を用いた。トレーサーガスとして6フッ化硫黄を用い，教室中央で常時一定量放出し，扇風機で教室全体に攪拌した。環境測定ポイントは2つ設置し，第1のポイントとして，教室内の前方中央部に，座位で呼吸する位置から空気を引き，教室内の6フッ化硫黄気中濃度を測定した。第2のポイントとして，廊下側のトイレの出入り口あたりから空気を引き，廊下の6フッ化硫黄気中濃度を約80秒ごとに測定した。

教室内の換気量算出理論式としては，下記の式が成り立つ。

$$V\frac{dC(t)}{dt} = M(t) - Q(t)\,C(t)$$

V：教室の気積　C (t)：教室の6フッ化硫黄濃度

M (t)：6フッ化硫黄の放出量　Q (t)：空気流出量

この式からQ (t)を求め，教室の換気回数（Q/V）を計算した。

環境測定にあたっては3つの条件を設定した。第1に通常の授業中の換気回数を確認することを目的に，教室の窓と出入り口を閉めた。第2に常時教室内に気流を発生させて変化を見ることを目的に，教室の窓と出入り口に5 cm程度の隙間を設けた。第3に休み時間における教室内と廊下の空気の攪拌を確認することを目的に，教室の出入り口を5分間全開した。

結　　果

定期外集団検診は，初発患者の登録直後，2カ月後，

Table 2 Rates of infection and cases in exposure group

Exposure group	No. of tested a	No. of chemo-prophylaxis b	No. of cases c	Rate of infection (b+c)/a	Rate of cases c/a
Household	3	0	3	100.0%	100.0%
Homeroom classmates	30	20	9 (2)***	90.0	30.0
Other classmates*	97	49	10	60.8	10.3
Other 3rd grade students**	140	47	7 (1)	37.9	5.0
First grade students	183	16	4 (1)	10.4	2.2
Second grade students	177	20	0	11.3	0.0
Contacts out of the school	88	3	1	4.5	1.1
Total	718	155	34 (4)	25.8	4.7

*Students and teaching staff having direct contact with the index case
**Third grade students and teaching staff having indirect contact with the index case
***( ): number of cases who were diagnosed as tuberculosis during or after chemoprophylaxis.

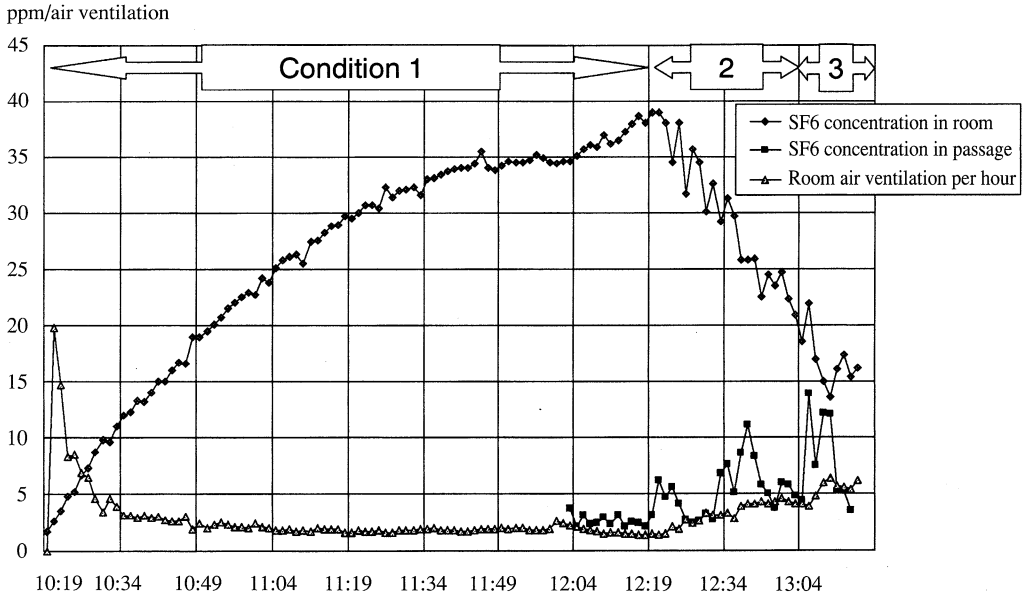

Fig. 2 SF6 concentration and air ventilation by time

6カ月後，12カ月後，18カ月後，24カ月後，36カ月後に実施し，155人に予防内服を指示し，28人の結核患者を発見した。初発患者登録後56カ月後までに，定期外集団検診以外に有症状受診で6人の結核患者が発見されており，発見患者の総数は34人で，そのうち4人は予防内服中・後の発病であった。培養陽性で菌株の得られた9人のRFLPパターンはすべて初発患者の菌株のRFLPパターンに一致していた。

初発患者との接触状況別の発病率，感染率をみると，Table 2に示すように初発患者との接触が濃厚なグループほど，発病率，感染率ともに高くなっており，同クラス生徒では感染率90.0%，発病率30.0%であり，合同授業，同クラブ，同塾の生徒と初発患者を教えた教諭のグループでは感染率60.8%，発病率10.3%であった。また，初発患者と直接接触はなかった他の3年生徒，1年生徒から11人の発病者が発見されていた。

環境測定時点の建物の状況として，3年校舎の教室と廊下の外側の窓はアルミサッシで冬期は閉められていた。教室と廊下は木製の窓でしきられ，出入り口は木製の引き戸であった。3年校舎への出入り口と通路への出入り口はアルミサッシの引き戸でしきられており，冬期は閉められていた。3年校舎の教室，校舎には，暖房器具や空調機器は設置されていなかった。

測定開始時（9:25）の教室の環境は，気温10.5℃，湿度52%，窓を閉めた状態の気流0.05 m/sec未満であった。教室の気積は195.7 m^3で，教室の人数（生徒30人と教諭1人）で割ると1人あたりの気積は6.3 m^3であった。測定途中（12:27）の教室の環境は，気温13.0℃，湿度50%であった。

実験結果をFig. 2に示した。

設定1（窓，出入り口を閉めきった状態）での教室換気回数は，6フッ化硫黄の放出直後には気中濃度が不安定のため，見かけ上高い値が見られた。一定時間が経過し，気中濃度の変化が安定した状態となり，教室での空気流出量を正確に計算できる状況となった時点での教室換気回数は1.6～1.8回/時間程度であった。設定1の最後には，6フッ化硫黄の教室濃度は約35 ppmまで上昇し，廊下気中濃度は3.0～3.5 ppmと教室内の10%程度の気中濃度が検出された。

設定2（5 cmの隙間を窓，出入り口に作った状態）での教室換気回数は，2.5～4.5回/時間まで上昇した。教室の6フッ化硫黄の気中濃度は20 ppm以下まで低下し，逆に廊下の6フッ化硫黄の気中濃度は6.0～9.0 ppmまで上昇した。

設定3（出入り口を全開にした状態）での教室換気回数は，さらに5.0～6.5回/時間まで上昇し，教室の6フッ化硫黄の気中濃度は15 ppmまで低下し，廊下の6フッ化硫黄の気中濃度10～14 ppmとほぼ同程度の値になった。

考　察

空気感染する結核の感染危険性は，未感染の接触者が吸い込む空気中の結核菌を含む感染性飛沫核の密度と時間によって決定される。今回の初発患者は，空洞性肺結核で喀痰塗抹ガフキー6号として発見されており，発見まで非常に激しい咳をし，大規模な集団感染の感染源となっていた。また，非常に軽微な接触での感染，発病がRFLP検査により確認されており[4]，初発患者はHighly Infectious Caseに該当し，非常に多くの感染性飛沫核を排出していたと考えられる。また，初発患者は1999年の1月28日に発見されているが，この時期の教室は，湿度が低く，気流がほとんどない状態であり，飛沫核がより形成されやすい環境にあり，このことが感染性を高めたと推測される。

一方，感染を規定する他の要因として環境要因があげられる。閉鎖的な空間で結核感染が起こった事例として，長距離旅客飛行機内で起こった結核感染[5]や，潜水艦内で起こった結核感染[6]，通勤バス内での結核感染[7]などが報告されている。建築物の環境については，接触者から16人の患者が発見された結核集団感染が起こったビル内の環境を二酸化炭素濃度と浮遊粉塵を用いて測定し，換気不十分な環境が集団感染の要因となることを指摘した報告[8]がある。

正確な換気の状況を調査するには，人工飛沫核粒子による測定やトレーサーガスを用いる測定法が知られている[9]。今回の調査ではトレーサーガスとして6フッ化硫黄[10]を用いて，結核集団感染が発生した中学校校舎の換気状態を把握し，大規模な集団感染の環境要因を検討した。室内換気回数の評価に二酸化炭素を用いる手法も存在するが，二酸化炭素自体は空気中に既に存在する。また今回の実験では，設定2，3で示したようにドアの開閉により意図せぬ濃度変化が発生する可能性があった。そこで，建築関係の換気実験でもしばしば用いられる6フッ化硫黄を今回の実験に用いた。6フッ化硫黄は大気中には存在しないため，短時間での換気回数の変化を正確に把握でき，ドア開閉等の実験条件の変更にも対応できる利点がある。また，教室から廊下への感染性飛沫核の汚染を調査するモデルという点からも適当と考えた。

環境実験の結果，窓を閉め切った状態の教室の換気回数は1.6～1.8回/時間であった。学校保健法の学校環境衛生[11]に示されている標準的な中学校の換気基準3.2回/時間に比べて少なく，長時間飛沫核が浮遊する状態にあったと推測される。1人あたりの気積も6.3 m^3であり，学校としては標準的ではあるが，一般の事務所の環境基準10 m^3/人以上と比べると少なく，同クラス生徒は感染性飛沫核を吸入しやすい環境にあったと考えられる。同クラス生徒は，感染率90.0%，発病率30.0%と高く，発病者9人中2人は予防内服中に発病し，うち1人は予防内服中にINH耐性を獲得した稀有な症例[12]であった。この非常に高い感染率，発病率の背景として，1人あたりの気積が少なく，換気も少ない濃厚な感染曝露環境が，長時間続いたことが考えられる。

3年校舎の教室は，初発患者の発見当時はほぼ同じ状況にあり，1人あたりの気積が少なく，換気の少ない濃厚な感染曝露環境はどの教室でも成立したと考えられる。初発患者は，時間割によって，3年校舎の1階，2階の教室，共用教室を使用しており，これらの教室で初発患者と一緒になった合同クラス生徒や教務教諭での感染率が60.8%，発病率は10.3%と高かったことは，各教室でも感染性飛沫核濃度が高い環境にあったことを示唆する。

実験設定2の結果から，5 cm程度窓を開けることで，教室の換気回数が増えることが確認できた。この設定は廊下の感染性飛沫核濃度が高まる点と，教室内の気温が下がることが予想される点で，学校で推奨される現実的な対策ではない。しかし，換気を増やすことにより結核感染が減少することを示した報告[13]もあり，今回の実験結果も換気を増加させることが結核感染防止につながる可能性を示している。空気感染の予防の視点から，空調等を整備することにより，建築物の環境を一定のレベルに保ったうえで，必要な換気の確保を目指すことも必要と考えられた。

一方，今回の集団感染事例では，初発患者と直接接触していない他の3年生徒，教諭，1年生徒からも発病者が11人みられた。今回と同じように学校で大規模な集団感染が起こった事例[14]では，感染源が教室を使った後

に教室を利用した者への感染が報告されている。今回の中学校でも，1年生の発病者4人中2人は，初発患者が音楽室を利用した次の時限に音楽室を利用したクラスからの発病であった。同様に3年校舎の教室や共用教室を初発患者の後に利用した他の3年生徒や教諭にも間接的に感染が起こった可能性が考えられた。

他の要因としては，感染性飛沫核の廊下の汚染も考えられた。すなわち，設定1の窓を閉め切った状態でも，教室内濃度の10%程度のガスが廊下で検出され，設定3の休み時間を想定した条件では，急速に教室内と廊下のガス濃度差が縮まっていた。この校舎は，教室と廊下の外側の窓はアルミサッシで冬期は閉められ，校舎への出入り口もアルミサッシの引き戸で冬期は閉められるため，校舎の気密性は高かった。この環境で，初発患者が多量に感染性飛沫核を排出し，休み時間にクラスと廊下の空気が攪拌されれば，廊下の感染性飛沫核濃度は間接的な感染が起こりえる程度に上昇していたと推測される。初発患者のいた3年1組の教室は，3年校舎の入り口に近く，ここは3年生徒や教諭，1年生徒の動線の近くにあった。この空間を移動した他の3年生徒，教諭，1年生徒が廊下の感染性飛沫核を吸入し，間接的な感染が拡大した可能性がある。これらの生徒，教諭のほとんどが結核に対し未感染であったことも，大規模な集団感染の要因と考えられる。

現在の結核接触者の対応では，会った時に話をする程度の接触の有無が，感染の可能性を推定する1つの目安になっている[1]。しかし，高松[15]は間接的な接触で2人の乳児が発病した病院での集団感染事例を報告している。中学校の校舎でも冬期で気密性が高まれば，間接的な感染が起こりえるという知見は，今後の対策を考えるうえで重要と考えられた。

ま と め

結核集団感染が起こった中学校で環境実験を行い，検討を行った結果，以下の3点が重なり大規模な集団感染に発展したと考えられた。

①感染源が感染性飛沫核を多量に排出するHighly Infectious Caseであった。

②教室と廊下のアルミサッシの窓を閉め切った状態では，1人あたりの気積が少なく，換気も少ない濃厚な感染曝露環境が教室で続いた。

③時間割によっては，初発患者は3年校舎の1，2階の教室や共用教室を使っていた。また，休み時間には教室から廊下へ感染性飛沫核が拡散し，初発患者の教室が3年校舎の入り口で，大部分が結核未感染の3年生徒，教諭，1年生徒の動線と交わっていた。

集団感染の予防のためには，感染源患者の早期発見が最も重要であるが，空気感染予防の視点から，適当な換気環境を整えることも重要である。

本検討については平成14年度厚生労働科学研究「建築物と結核（総括研究者　山下武子）」の助成を受けた。稿を終えるにあたり，環境測定ならびに本稿作成にご指導，ご協力を賜りました高知医科大学看護学科　甲田茂樹教授に深謝いたします。

文　献

1）森　亨編：結核の積極的疫学調査.「保健所における結核対策強化の手引きとその解説」，結核予防会，東京，2000，16–69.
2）Raffalli J, Sepkowitz KA, Armstrong D, et al.: Community-based outbreaks of tuberculosis. Arch Intern Med. 1996; 156: 1053–1060.
3）青木正和：本邦における結核症の現状と課題—予防，診断，および治療—. 結核. 1999; 74: 683–691.
4）豊田　誠，森岡茂治：高知市中学校における結核集団感染—感染要因と化学予防の効果に関する検討—. 結核. 2001; 76: 625–634.
5）Thomas AK, Sarah EV, Walter WI, et al.: Transmission of multidrug-resistant *Mycobacterium tuberculosis* during a long airplane flight. N Engl J Med. 1996; 334: 933–938.
6）Houk VN, Barker JH, Sorensen K, et al.: The epidemiology of tuberculosis infection in a closed environment. Arch Environ Health. 1968; 16: 26–35.
7）八木毅典，佐々木結花，山岸文雄，他：企業の通勤バス内での結核小規模感染事例の検討. 結核. 1999; 74: 507–511.
8）Shigematsu I, Minowa M: Indoor infection in a modern building. Tokai J Exp Clin Med. 1985; 10: 407–413.
9）Pavelchak N, Palmer W, DePersis RP, et al.: A simple and inexpensive method for determining the effective ventilation rate in a negatively pressurized room using airborne particles as a tracer. Appl Occup Environ Hyg. 2002; 17: 704–710.
10）Marshall JW, Vincent JH, Kuehn TH, et al.: Studies of ventilation efficiency in a protective isolation room by the use of a scale model. Infect Control Hosp Epidemiol. 1996; 17: 5–10.
11）学校保健教育課：学校環境衛生の基準（文部省体育局長通知・文体学第187号）. 文部省体育局裁定，平成4年6月，一部改定平成14年2月5日，7–8.
12）豊田　誠，森岡茂治：化学予防中にINH耐性で発病した結核患者. 結核. 2001; 76: 663–666.
13）Nardell EA, Keegan J, Cheney SA, et al.: Airborne infection. Theoretical limits of protection achievable by building ventilation. Am Rev Respir Dis. 1991; 144: 302–306.
14）Sacks JJ, Brenner ER, Breeden DC, et al.: Epidemiology of a tuberculosis outbreak in a South Carolina junior high school. Am J Public Health. 1985; 75: 361–365.
15）高松　勇，亀田　誠，井上寿茂，他：病院患者間の結核集団感染. 結核. 1999; 74: 397–404.

Original Article

ENVIRONMENTAL FACTORS RELATING TO A MASS OUTBREAK OF TUBERCULOSIS IN A JUNIOR HIGH SCHOOL

Makoto TOYOTA

Abstract [Objective] To clarify environmental factors relating to a mass outbreak of tuberculosis.

[Methods] A 15-year old girl, a third-grade student of a junior high school (the index case) was found to have smear-positive cavitary pulmonary tuberculosis. Among 718 subjects who underwent contacts investigation, the rates of infection and cases among different exposure groups were compared. The ventilation rate within the room of the junior high school was analyzed using sulfur hexafluoride (SF6) as the tracer gas.

[Results] Up to 56 months after the detection of the index case, a total of 34 tuberculosis patients were newly diagnosed, and 155 persons were subjected to chemoprophylaxis. The rates of infection were 90.0% among homeroom classmates and 60.8% among other classmates, respectively. Out of the subjects who had only indirect contact with the index case, 11 patients were diagnosed. Most of the windows of the building were of the fixed sash type, permitting only low ventilation ranging from about 1.6 to 1.8 room air change per hour. When sliding doors of the room were opened, the SF6 concentration in the room was rapidly mixed up with that in the passage.

[Conclusion] Low ventilation of the room and overcrowding contributed to the high infection rate among homeroom classmates. Infectious droplet nuclei spread to the passage at recess. The homeroom of the index case was located in front of the building's entrance. The index case used some common rooms of the building. In addition to these environmental factors, other factors, especially the high infectiousness of the index case also contributed to the mass outbreak.

Key words: Tuberculosis outbreak, Junior high school, Building, Environmental factor, Ventilation, Sulfer hexafluoride (SF6)

Hata Health Center, Kochi Prefecture

Correspondence to: Makoto Toyota, Hata Health Center, 19, Yamatetori, Nakamura-shi, Kochi 787−0028 Japan.
(E-mail: makoto_toyota@ken4.pref.kochi.jp)